

Diplomová práce

Měření zatížení šroubových spojů automobilových konstrukcí

The load of screw joints between a car chassis parts

Autor práce:

Bc. David Bilík

Rok odevzdání:

2021

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. David Bilík

Studijní program: N0715A270004 Materiály a technologie pro automobilový průmysl

Téma: Zatížení šroubových spojů automobilových konstrukcí
The load of screw joints between a car chassis parts

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s výpočty a měření sil ve šroubovém spoji.
2. Na prototypovém vozidle navrhnete místa pro měření sil a odhadnete očekávané hodnoty.
3. Realizujete měření sil ve šroubových spojiích na prototypovém vozidle.
4. Zhodnotíte výsledky a navrhnete další postup.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] VLK, František. Dynamika motorových vozidel. 2. vyd. Brno: F. Vlk, 2003. ISBN 80-239-0024-2.
- [2] Matýsek, Tomáš. Výpočet tepelně namáhaného šroubového spoje. Bakalářská práce, VŠB TUO, 2011.
- [3] National Instruments, NI 9237 datasheet, dostupné online z https://www.ni.com/pdf/manuals/374186a_02.pdf.
- [4] OmegaEng, Load washers for measuring bolt compression forces, datasheet, dostupné online z <https://br.omega.com/omegaFiles/pressure/pdf/LCMWD.pdf>
- [5] HBM, LB11 & TB21: Strain Gauges for Measurements in Screws and Bolts, dostupné online z <https://www.hbm.com/en/7452/cylindric-strain-gauges-for-measurements-in-bolts>.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2020

Datum odevzdání: 23.04.2021

doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Poděkování

Děkuji za odborné rady, vedení a připomínky k zpracování mé diplomové práce doc. Ing. Petrovi Tomčíkovi, Ph.D. Dále mé poděkování patří celé katedře Materiálů a technologií pro automobilový průmysl za cenné rady nejen při vykonávání praktické části.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na měření zatížení šroubových spojů automobilových konstrukcí. První část se zabývá silami ve šroubovém spojení. Dále je vysvětlen princip tenzometrie a popsáno měření sil ve šroubech pomocí tenzometrické podložky. V další části práce jsou navržena vhodná místa na karoserii automobilu pro měření sil ve šroubech a určeny předpokládané výsledky. Další částí je část praktická, která se zabývá kalibrací snímače a umístěním snímačů na vozidlo. V poslední části jsou zhodnoceny výsledky kalibrace a navržen další postup.

Klíčové slova:

Šroubový spoj, tenzometrická podložka, kalibrace snímače, síly v nápravách, jízdní zkoušky

Abstract

The diploma thesis is focused on measuring the load of screw joints of car chassis parts. The first part is focused on the forces in the screw joints. Furthermore, the tensometry principle is explained and the measurement of forces in the screws by using the load washer is described. In the next part of the thesis, suitable positions on car body for measuring forces in the screws are designed and there are assumed results included. The following part is the practical part, which deals with sensor calibration and placing the sensor on the car. In the last part, the results of the calibration are evaluated and the further method is designed.

Keys words:

Screw joint, load washer, sensor calibration, forces in the axles, driving tests

Obsah

Úvod	1
1 Výpočty a měření sil ve šroubovém spoji	2
1.1 Šrouby	2
1.1.1 Silový rozbor ve šroubovém spojení	3
1.1.2 Utahovací moment	6
1.1.3 Tuhost šroubu	7
1.1.4 Výpočet tuhosti přírub	7
1.1.5 Síly v předepjatém šroubovém spoji	9
1.2 Tenzometrická podložka	11
1.2.1 Tenzometrie	12
1.2.2 Princip tenzometru	12
1.2.3 Zapojení tenzometru	13
1.2.4 Vlastnosti ovlivňující odporové tenzometry	14
2 Návrh míst pro měření sil	15
2.1 Umístění tenzometrických podložek pro šroub M10	15
2.1.1 Rozbor působících sil na nápravy	16
2.1.2 Předpokládané působící síly na nápravy	27
2.2 Umístění tenzometrických podložek pro šroub M6	29
2.2.1 Výroba vložky pro měření tenzometrickou podložkou	30
2.3 Porovnání očekávaných hodnot s reálnými daty	31
2.3.1 Jízdní zkoušky	31
2.4 Výpočet šroubů M10 v úchytech ramen	32
2.4.1 Tuhost šroubu	32
2.4.2 Tuhost příruby	34
2.4.3 Výpočet sil působících na šroub:	35
2.4.4 Výpočet utahovacího momentu	36

2.4.5	Bezpečnost šroubu.....	37
2.4.6	Určení utahovacího momentu a síly předpětí pro šroub M10	38
2.4.7	Bezpečnost šroubu pro zvolený moment.....	39
2.5	Výpočet šroubů M6 na beriovém boxu.....	40
2.5.1	Tuhost šroubu	40
2.5.2	Tuhost příruby	41
2.5.3	Určení utahovacího momentu a síly předpětí ve šroubu M6.....	42
3.	Měření sil ve šroubovém spoji	43
3.1	Kalibrace tenzometrické podložky	43
3.1.1	Zapojení komponentů pro kalibraci.....	43
3.1.2	Kalibrace přes kalibrační válečky.....	46
3.1.3	Přípravek na kalibraci tenzometrické podložky	48
3.1.4	Kalibrace tenzometrické podložky LCMWD-50KN.....	50
3.1.5	Srovnání naměřených dat s kalibračním listem.....	53
3.1.6	Kalibrace tenzometrické podložky LCM901-6-10KN.....	54
3.2	Příprava tenzometrických podložek na automobilu.....	57
3.2.1	Instalace tenzometrických podložek pro šroub M10.....	57
3.2.2	Instalace tenzometrických podložek pro šroub M6.....	58
4.	Zhodnocení výsledku a navržení dalšího postupu.....	59
4.1	Zhodnocení kalibrace.....	59
4.2	Navržení dalšího postupu.....	60
	Závěr.....	61
	Seznam obrázků.....	62
	Seznam tabulek.....	63
	Seznam použité literatury	64

Úvod

Šroubové spoje jsou spolu se svařovanými a lepenými spoji nejpoužívanějším typem spojení na automobilu. Šroubový spoj najdeme na každém automobilu v mnoha aplikacích a jeho použití je v dnešní době naprosto zásadní. Tento typ spoje má řadu výhod, ať už je to jeho rozebíratelnost, jednoduchost nebo opakovatelná montáž. Šroubový spoj má ovšem i své nevýhody a mezi ně patří například oslabení spoje dírami, anebo zvýšení hmotnosti samotného spoje.

I přes obrovské výhody šroubového spoje, takřka neomezených možností spojování různorodých součástí a univerzálnosti, je tento typ spoje ovlivněn řadou faktorů, které ovlivňují jeho funkčnost a spolehlivost. Nejčastěji se tak jedná o takzvané samovolné uvolnění šroubu vlivem dynamického zatížení, nebo nedůsledným dotažením požadovaného momentu. Další problém může nastat při špatném návrhu šroubového spoje, například nedostatečným dimenzováním spoje, což má v praxi za následek vytržení závitu nebo ulomení šroubu.

K měření sil, které působí ve šroubech při jeho provozu, se využívají tenzometrické podložky, které jsou umístěny mezi šroubem a maticí a jsou schopny měřit osovou sílu šroubu. Tento typ podložek pracuje na principu změny mechanického napětí v kovové podložce změnou elektrického odporu. Tato tenzometrická podložka je typem odporového tenzometru, který spadá do skupiny elektrických tenzometrů.

Novým typem, který vznikne na Vysoké škole báňské na katedře Materiály a technologie pro automobily, bude koncept automobilu s názvem Titan. Tento koncept je vytvořen za pomoci studentů a bude v řadě věcí revoluční. Elektromobil Titan bude osazen čtyřmi elektromotory pro každé kolo zvlášť a má být přímým nástupcem vozu SCX.

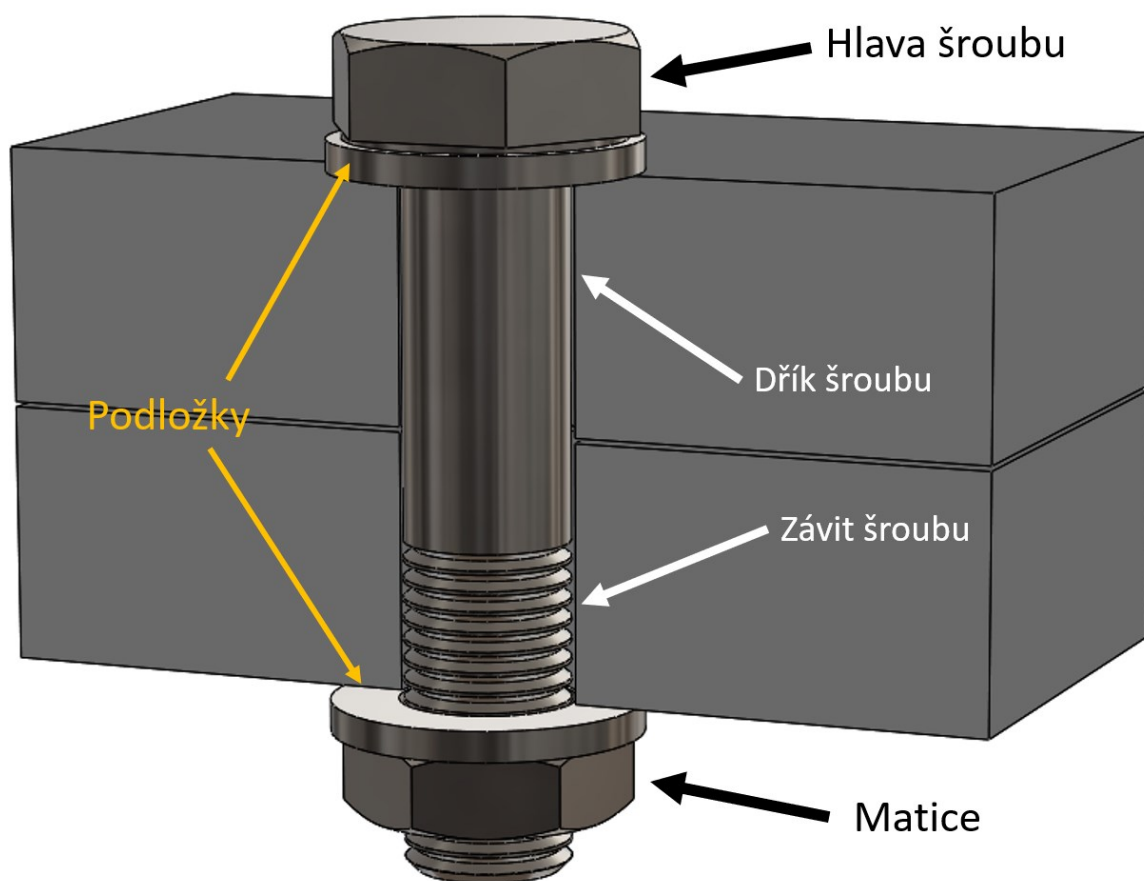
Cílem této diplomové práce je měření zatížení šroubových spojů automobilových konstrukcí, konkrétně na voze Titan. Dalším bodem je ověření, zda při jízdních zkouškách, ale i při pouze statickém působení sil, nedojde k samovolnému uvolnění šroubového spoje.

1 Výpočty a měření sil ve šroubovém spoji

Šroubový spoj je poměrně složitý celek a jeho správná funkčnost závisí na hodně faktorech. Výpočtem šroubů a sil ve šroubovém spoji je zabývána tato kapitola. Sílu, která působí ve šroubech je obtížné jakoukoliv měřicí technikou naměřit, proto se pro měření sil ve šroubech nejčastěji používají tenzometry. Tenzometrům je věnována druhá část této kapitoly.

1.1 Šrouby

Šrouby a matice jsou nejpoužívanějším rozebíratelným spojením. Tento typ spojení má řadu výhod, jako jsou jednoduchost, pevnost, spolehlivost, jednoduchá a opakovatelná montáž bez poškození součástí a umožnění stáhnutí součástí předepsanou silou. Mezi nevýhody těchto spojů patří to, že spojení součástí je citlivé na chvění, kterým se spoj uvolňuje. Šroubový spoj také zvyšuje hmotnost stroje a zeslabuje ho dírami. Na **Obr. 1** je naznačen typický šroubový spoj a popsány jednotlivé části šroubu.

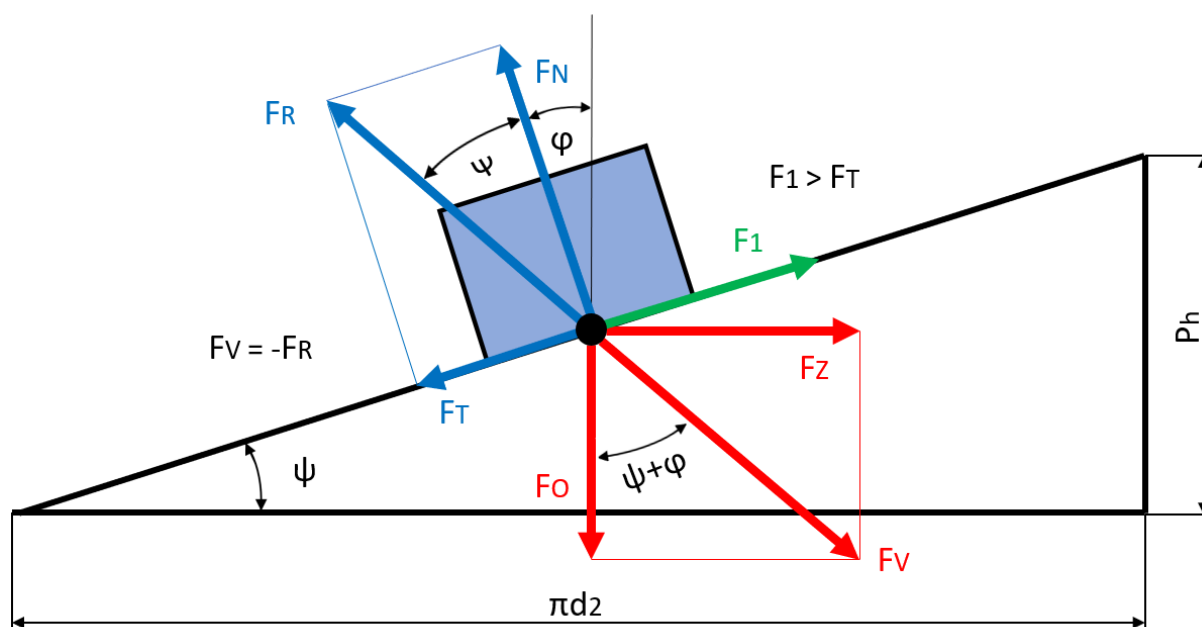


Obr. 1 Šroubový spoj

1.1.1 Silový rozbor ve šroubovém spojení

Soustava sil působících na šroub má rozložení stejné jako soustava sil působící na nakloněné rovině, vznikající rozvinutím jednoho stoupání P_h na středním průměru šroubu d_2 do roviny. Síly, které jsou reálně rozloženy v závitu, jsou zde pro jednoduchost redukovány do jediného bodu. Rovina je nakloněna o úhel stoupání závitu ψ . Hnací obvodová síla otáčející maticí F_Z působí na rameni, kterým je polovina středního průměru závitu d_2 . Ve směru osy šroubu působí zatěžující osová síla F_O , která odpovídá tíze břemene na nakloněné rovině. Výslednice těchto dvou sil F_V vyvozuje opačnou reakční sílu F_R , kterou lze rozložit na třecí sílu F_T působící proti smyslu otáčení matice, ve směru vlnutí závitu a na ní kolmou normálovou složku F_N . Úhel, který odklání reakční sílu F_R od její normálové složky F_N , je třecí úhel φ . Situace při utahování matice je naznačena na **Obr. 2** a platí pro ni následující vztah: [1, 2]

$$F_Z = F_O \cdot \operatorname{tg} (\psi + \varphi) \quad (1)$$



Obr. 2 Síly působící na závit [1]

F_1 – síla přitěžující [N]

F_O – axiální osová síla ve šroubu – zatěžující síla [N]

F_Z – síla působící na středním průměru šroubu – hnací síla [N]

F_N – normálová síla v závitu [N]

F_R – reakční síla v závitu [N]

F_V – výsledná zatěžující síla v závitu [N]

F_T – třecí síla v závitu [N]

$$\varphi - \text{třecí úhel } [^\circ] \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{F_T}{F_N} [^\circ]$$

$$\psi - \text{úhel stoupání závitu } \operatorname{tg} \psi = \frac{P_h}{\pi \cdot d_2} [^\circ]$$

$$f - \text{součinitel smykového tření } f = \operatorname{tg} \varphi$$

$$P_h - \text{stoupání závitu [mm]}$$

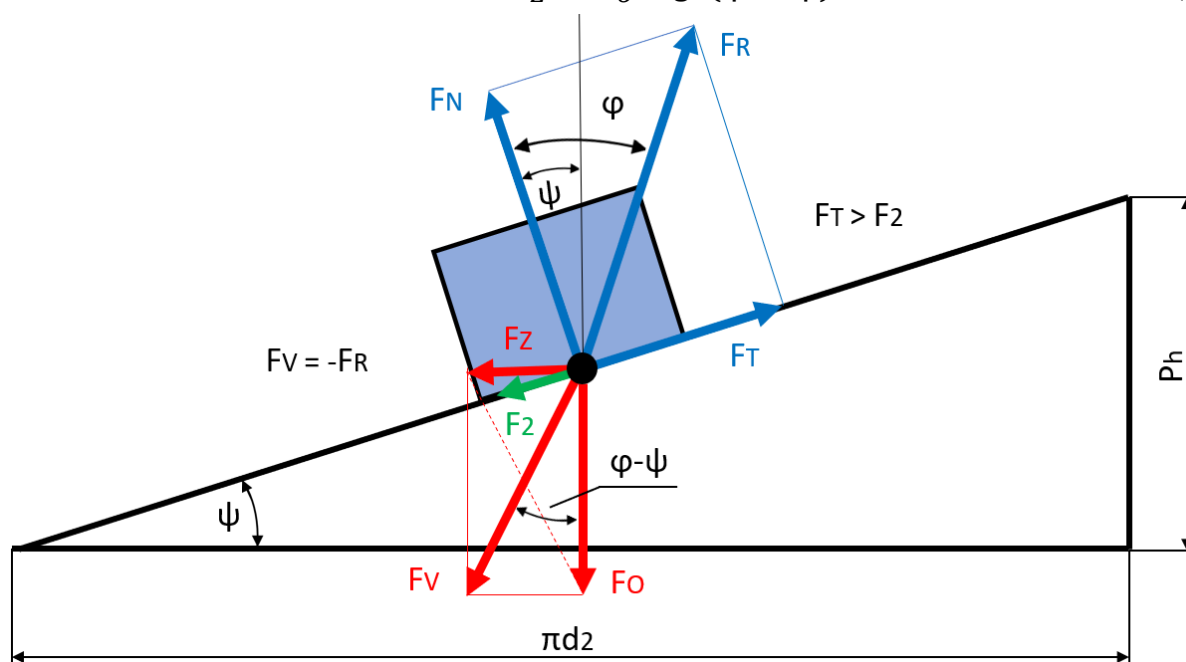
$$r_2 - \text{střední poloměr závitu [mm]}$$

$$d_2 - \text{střed průměr závitu [mm]}$$

Podmínkou samosvornosti je, aby se matice nedala do pohybu působením pouze osové síly, tudíž aby třecí síla F_T byla větší než síla F_2 vyvozená zatěžující silou F_0 . Po dosazení do této podmínky a algebraických úpravách vychází podmínka samosvornosti (**Obr. 3**). Platí pro ni vztahy: [1, 2]

$$\varphi > \psi \quad (2)$$

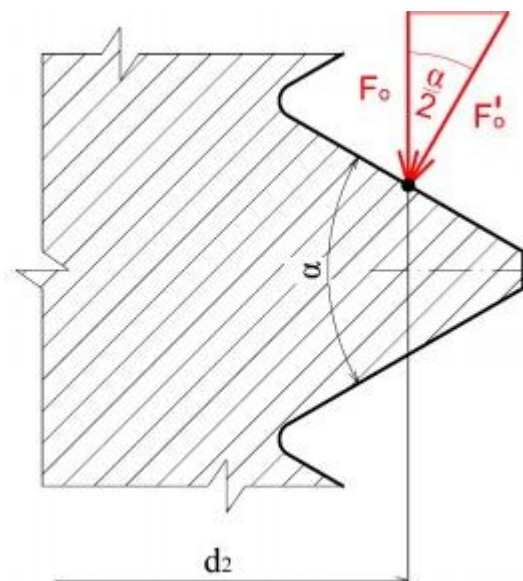
$$F_Z = F_0 \cdot \operatorname{tg} (\varphi - \psi) \quad (3)$$



Obr. 3 Samosvorný závit [1]

$$F_2 - \text{síla odlehčující [N]}$$

Výše uvedené skici a závislosti platí, jak již bylo zmíněno, pro plochý profil závitu. Reálně používané závity mají nejčastěji profil závitu ostrý, čímž dále dochází k odklonu sil dle **Obr. 4** a pro třecí sílu F_T platí následující vztahy: [1, 2]



Obr. 4 Profil závitu s ostrým úhlem [1]

$$F_T = F_O' \cdot f \quad (4)$$

$$F_T = \frac{F_O}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \cdot f \quad (5)$$

$$F_T = F_O \cdot f' \quad (6)$$

α – vrcholový úhel profilu závitu [°]

f' – součinitel smykového tření v ostrém závitu

F_O' – zatěžující osová síla v ostrém závitu [N]

Pro ostrý závit má součinitel smykového tření tvar:

$$f' = \operatorname{tg} \varphi' = \frac{f}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (7)$$

φ' – třecí úhel v ostrém závitu [°]

1.1.2 Utahovací moment

Předeptatý šroubový spoj je postupně dotahován potřebným utahovacím momentem. Tím postupně narůstá vnitřní osová síla F_O ve spoji, až do požadované hodnoty, zajišťující kompaktnost celého šroubového uzlu. Správně realizovaný předeptatý spoj zajišťuje neměnnost vzájemné polohy jednotlivých součástí a odolává i proměnnému zatížení vnějších provozních sil, na které je dimenzován. [1]

Utahováním šroubu je nutno momentem na klíči M_T překonat moment odporu v závitech M_Z a moment tření M_{TM} na dosedací ploše šroubové hlavy nebo matice. Z této definice plyne vztah: [1]

$$M_T = M_Z + M_{TM} \quad (8)$$

M_T – celkový moment na klíči,

M_Z – moment odporu v závitech,

M_{TM} – moment tření na dosedací ploše.

Moment potřebný k překonání odporu v závitech matice:

$$M_Z = \frac{d_2}{2} \cdot F_O \cdot \operatorname{tg}(\psi + \varphi') \quad (9)$$

Třecí moment pod dosedací plochou matice:

$$M_{TM} = F_O \cdot f \cdot S_D \quad (10)$$

S_D – třecí poloměr matice [mm]

1.1.3 Tuhost šroubu

Výpočet tuhosti šroubu vychází z Hookova zákona, kde se předpokládá pružná deformace šroubu. Tuhost se obecně nazývá odpor součásti proti deformaci. Základním vztahem pro výpočet pak je: [1]

$$c_s = \frac{E \cdot S_s}{l_s} \quad (11)$$

c_s – tuhost šroubu [$N \cdot mm^{-1}$]

E – modul pružnosti v tahu [MPa]

S_s – průřez šroubu [mm^2]

l_s – deformační délka šroubu [mm]

Šroub je ovšem složen z více částí a jeho prvky jsou spojené za sebou (sériově) a tudíž se výsledná tuhost vypočte jako převrácená hodnota tuhosti ze vztahu: [1]

$$c = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{c_i}} \quad (12)$$

c_i – tuhosti jednotlivých částí šroubu

1.1.4 Výpočet tuhosti přírub

Stejně jako u šroubu se vychází z Hookova zákona, ovšem tuhost značíme odlišnými indexy: [1]

$$c_p = \frac{E \cdot S_p}{l_p} \quad (13)$$

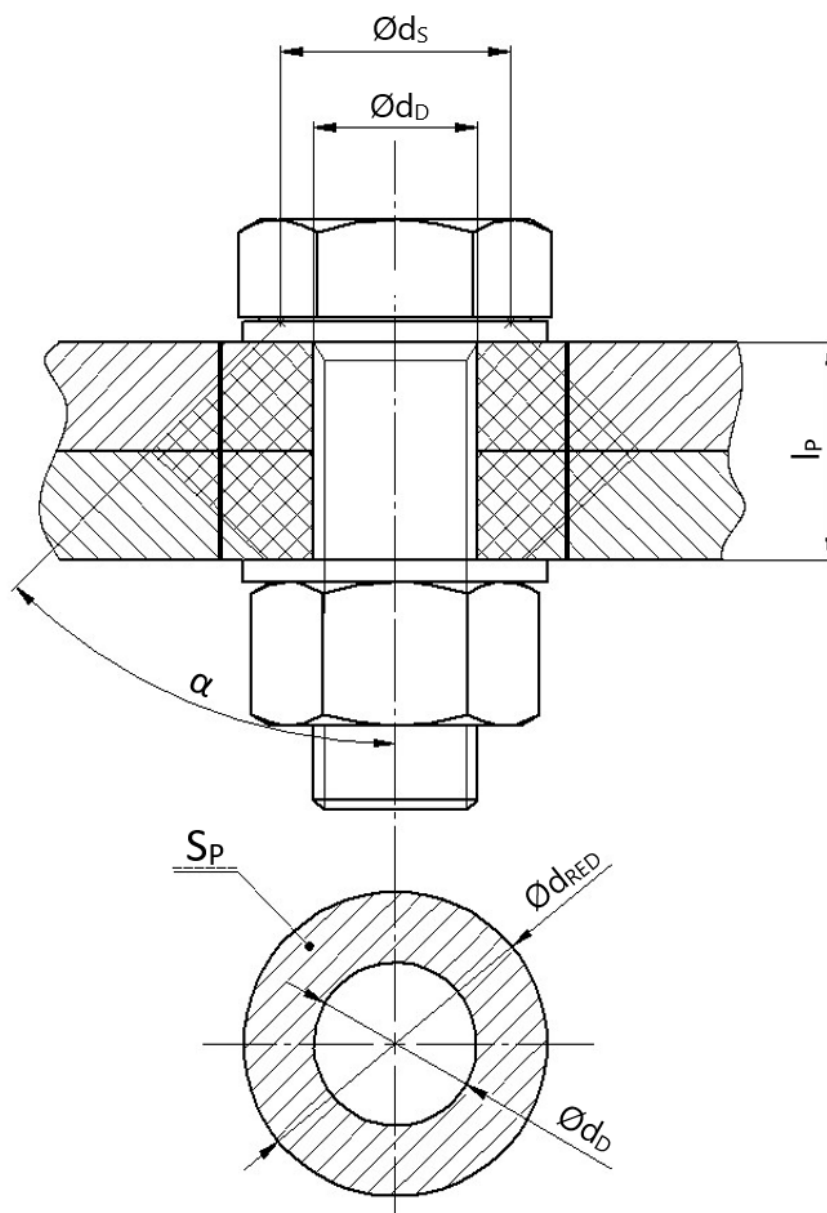
c_p – tuhost příruby [$N \cdot mm^{-1}$]

S_p – průřez příruby [mm^2]

l_p – deformační délka příruby [mm]

Při určení tuhosti přírub se analogicky jako u šroubu vychází z Hookova zákona pro pružnou deformaci. Přírubu představují dvě rovinné desky, které jsou stlačovány šroubovým spojem. Určení deformovaného průřezu není tak jednoznačné jako u šroubu, avšak dá se určit pomocí zjednodušení a tzv. podmínkou „stejného objemu“ (ve skutečnosti se nejedná o stejný objem komolého dvojkužele a dutého válce, ale o stejnou plochu, která se převedením nemění).

V ideálním případě svírá površek komolého kužele s osou šroubu úhel $\alpha = 45^\circ$, přičemž površek reprezentuje směr maximálního smykového napětí a osa šroubu směr hlavních napětí. Pro určení deformačního průřezu pak poslouží vnitřní (vnitřní průměr podložky) a vnější (redukovaný průměr vzniklý převodem) průměr náhradní trubky. [1, 3]



Obr. 5 Výpočet tuhosti příruby [1]

Výpočet redukovaného průměru:

$$d_{RED} = d_s + \frac{l_P}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (14)$$

d_{RED} – redukovaný průměr [mm]

d_s – průměr dotyku pod maticí [mm]

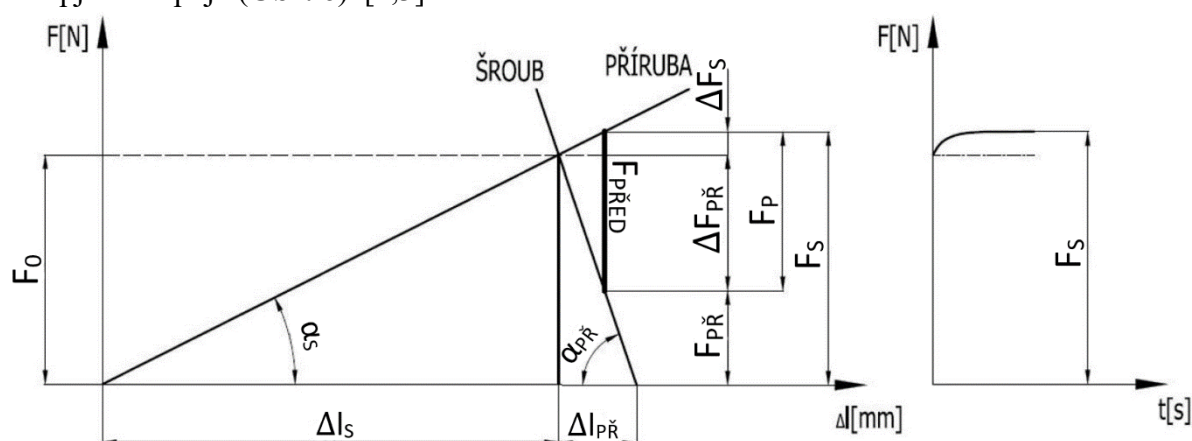
Určení deformovaného průřezu přírub S_P :

$$S_P = \frac{\pi \cdot (d_{RED}^2 - d_D^2)}{4} \quad (15)$$

d_D – vnitřní průměr podložky pod maticí a šroubem [mm]

1.1.5 Síly v předepjatém šroubovém spoji

Pro šroubový spoj a vyvození jeho předpětí musí platit podmínka těsnosti spojení. To znamená, že minimální síla v přírubách při zatížení provozní silou musí být větší než nula. Hodnota této síly je pak dána součinitelem těsnosti. Pro těsnost spojení musí platit $F_{PŘ} > 0$. Často se přitlačná síla v přírubách volí v závislosti na provozní síle při požadované těsnosti spoje, která se volí $\psi_T = 0,2 \div 1,3$. Pro dané šroubové spojení pak určíme pomocí následujících vztahů všechny síly působící v tomto spoji. Zobrazení těchto sil reprezentuje diagram předepjatého spoje (**Obr. 6**). [1,3]



Obr. 6 Diagram předpjatého šroubového spoje [3]

Výpočet minimální síly v přírubách:

$$F_{PŘmin} = F_p \cdot \psi_T \quad (16)$$

$F_{PŘmin}$ – minimální síla v přírubách [N]

F_p – síla provozní [N]

ψ_T – součinitel těsnosti spojení

Výpočet předpětí:

$$F_O = F_p \left(\psi_T + \frac{c_p}{c_p + c_s} \right) \quad (17)$$

F_O – síla předpětí [N]

Síla předpětí šroubového spoje se rovná minimální síle ve šroubu, proto minimální sílu ve šroubu již nepočítáme.

Výpočet maximální síly ve šroubu:

$$F_S = F_p \cdot (\psi_T + 1) \quad (18)$$

F_S – síla ve šroubu [N]

Přírůstek síly ve šroubu:

$$\Delta F_S = F_p \cdot \frac{c_s}{c_p + c_s} \quad (19)$$

ΔF_S – přírůstek síly ve šroubu [N]

Úbytek síly v přírubách:

$$\Delta F_{PŘ} = F_p \cdot \frac{c_p}{c_p + c_s} \quad (20)$$

$\Delta F_{PŘ}$ – úbytek síly v přírubách [N]

1.2 Tenzometrická podložka

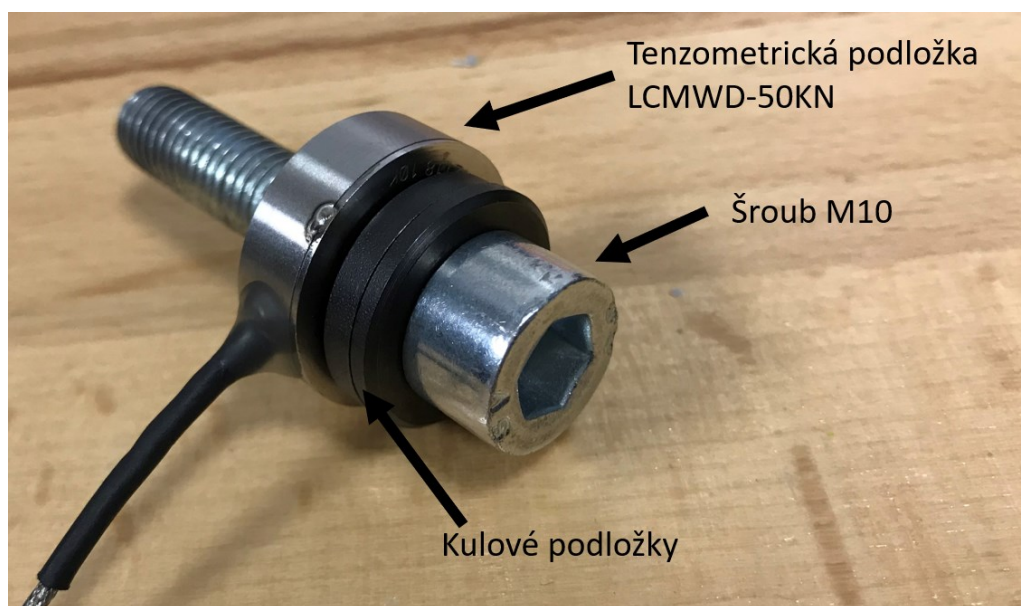
Pro měření osově síly byla zvolena siloměrná podložka LCMWD-50KN pro šrouby M10 a LCM901-6-10KN pro šrouby M6 od výrobce Omega. Od každého typu podložek byly dodány dva kusy tenzometrických podložek.

Tento snímač pracuje na principu Wheatsonová můstku, sestaveného ze 4 tenzometrických senzorů. Tyto jsou přilepeny na stěny snímače a reagují na změny mechanického napětí v kovové podložce změnou elektrického odporu. Tím dochází k rozvážení můstku a toto je možno vyhodnocovat jako změnu výstupního napětí v mV (při konstantním napájecím napětí můstku).

Tyto podložky jsou vhodné pro měření axiálních sil šroubových spojů. Tenzometrická podložka je zabezpečena stupněm krytí IP67, tedy kompletní ochrana vůči vniknutí prachu či vody. Výrobce garantuje, že tenzometr bude fungovat od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až po $127\text{ }^{\circ}\text{C}$. Maximální velikost axiální síly, kterou jsou snímače schopny změřit, je 50 kN (pro šroub M10) a v případě podložek pro šrouby M6 je to síla 10 kN. Podložky jsou tedy dostatečně dimenzovány, protože pro naše účely se dostaneme maximálně k hodnotám 10 kN.

Pro správnou funkci podložky je důležité dostatečné vystředění kolem měřeného šroubu, každá sebemenší odchylka může výrazně ovlivnit měření tenzometru. Jelikož je tenzometr zatížen pouze axiální silou, není tedy nutné podložku zajišťovat také proti rotačnímu pohybu. [7]

Společně s tenzometrickou podložkou byl dodán také kalibrační list a kalibrační přípravky (válečky) pro vlastní kalibraci podložky. Na **Obr. 7** je zobrazena tenzometrická podložka.



Obr. 7 Tenzometrická podložka LCMWD 50KN od firmy Omega

1.2.1 Tenzometrie

Tato práce se zabývá odporovými tenzometry, které spadají do skupiny elektrických tenzometrů. To znamená, že při mechanickém namáhání v oblasti pružných deformací dochází u kovových vodičů ke změnám jejich elektrického odporu. Pružnými deformacemi rozumíme takové síly, které působí v mezích platnosti Hookova zákona a jsou zpravidla vyvolány tlakem nebo tahem. Odporový tenzometr tedy neměří přímo deformace, nýbrž změnu elektrického odporu, ze kterého dokážeme pomocí fyzikálních vztahů vypočítat deformace, či dále napětí v součásti.

K měření osově síly se používají tenzometrické snímače zatížení. Působící tíhou na tenzometr dochází k mechanické deformaci deformačního členu. Tenzometr je pasivní elektrotechnická součástka, která mění svůj odpor vlivem mechanického zatížení a vytváří mechanicko-elektrický převodník, schopný měřit dlouhodobě vysoká zatížení. [8, 9, 10]

1.2.2 Princip tenzometru

Pro lepší představu, na jakém principu tenzometry fungují, je nutné vyjádření fyzikální podstaty pomocí rovnic. [8]

Vycházíme z těchto předpokladů – z elektrotechniky, kde si definujeme odpor vodiče

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (21)$$

R – elektrický odpor [Ω]

ρ – měrný odpor materiálu vodiče [Ωm^{-1}]

S – průřez [m^2]

l – délka [m]

Při namáhání vodiče v tahu dojde k jeho natažení o určitou délku Δl a zároveň se mírně zmenší průřez. To způsobí změnu odporu. Relativní změna odporu je u kovových odporových tenzometrů přímo úměrná relativnímu prodloužení: [9]

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l} = k \cdot \varepsilon \quad (22)$$

k – koeficient deformační citlivosti (velikost závisí na materiálu vodiče)

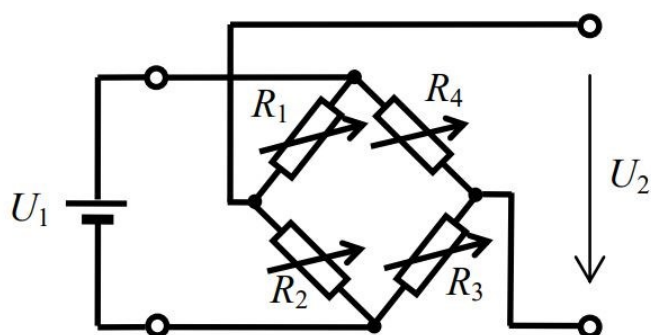
Z hlediska měřicí techniky by měl být koeficient deformační citlivosti stálý, nezávislý na deformaci, teplotě a na technologické přípravě deformačního materiálu. Hodnota k v praxi se téměř vždy určuje experimentálně. Protože při vyhodnocování odporu tenzometru neměříme poměrnou změnu odporu, ale přímo diferenci ΔR , která závisí na změně Δl , je výhodné, aby délka l vodiče byla co největší. [10]

1.2.3 Zapojení tenzometru

Změna odporu tenzometru je velmi malá, běžným ohmmetrem neměřitelná, k jejímu vyhodnocení se proto používá můstkového zapojení. V můstkovém zapojení nevyhodnocujeme celkovou (absolutní) hodnotu odporu, ale pouze její změnu. Existuje několik zapojení můstků, nejjednodušší a nejčastější je tzv. Wheatstonův můstek. Jeho základní zapojení vysvětluje **Obr. 8**. Pokud budou všechny odpory stejně velké a všechny se budou moci maličko měnit, (malá změna, řádově do 1 %), pak bude pro výstupní napětí můstku platit: [8]

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (23)$$

$U_{1,2}$ – napětí [V]



Obr. 8 Základní zapojení Wheatstonova můstku [8]

Ideální je, aby se všechny odpory v můstku měnily působením měřené veličiny, a to tak, aby se R_1 a R_3 měnily jedním směrem (např. rostly) a R_2 a R_4 opačným směrem (klesaly). Pak je citlivost můstku největší. To je ale možné pouze u některých aplikací, např. při snímání síly ohýbající nosník pomocí tenzometrů (horní se natahují, dolní stlačují). Při měření jiných veličin, např. teploty, to není možné (odpor se změnou teploty pouze roste). Pokud jsou všechny odpory v můstku ovlivňovány měřenou veličinou, jedná se o tzv. plný (celý) můstek, pokud jsou měřenou veličinou ovlivňovány pouze dva odpory, jde o poloviční můstek, pokud pouze jeden, jde o čtvrtinový můstek. Zbylé odpory v můstku pak mohou být obyčejné rezistory se stejnou ohmickou hodnotou (levnější, jednodušší), nebo stejná odporová čidla, s kterými se měří, ale neovlivňovaná měřenou veličinou. [8]

1.2.4 Vlastnosti ovlivňující odporové tenzometry

Linearita

Linearita udává maximální odchylku reálného výstupního signálu od ideálního přímkového průběhu, který je dán jako spojnice počátku s hodnotou výstupního signálu při jmenovité hodnotě zatěžující síly. [8]

Hystereze

Hystereze se projevuje při střídavém zatěžování a odlehčování součásti s nalepeným tenzometrem a je definována jako největší odchylka mezi hodnotou výstupního signálu při zatěžovacím a odlehčovacím cyklu pro danou hodnotu zatížení. [8]

Vliv teploty

Velikost elektrického odporu je ovlivněna řadou faktorů, mezi něž se řadí i vliv teploty. V případě, že se teplota zvyšuje, pak roste elektrický odpor vodiče. V případě, že se teplota snižuje, snižuje se i elektrický odpor, a u některých materiálů může dojít až k jeho zmizení (supravodivost). [8]

Jelikož odporový tenzometr má stejné elektrické vlastnosti jako elektrický odpor, tak i na něj má vliv teplota. U tenzometrů je vliv teploty nežádoucí, jelikož způsobuje chybu měření. Proto se běžně tenzometry zapojují tak, aby se vliv teploty kompenzoval. [8]

2 Návrh míst pro měření sil

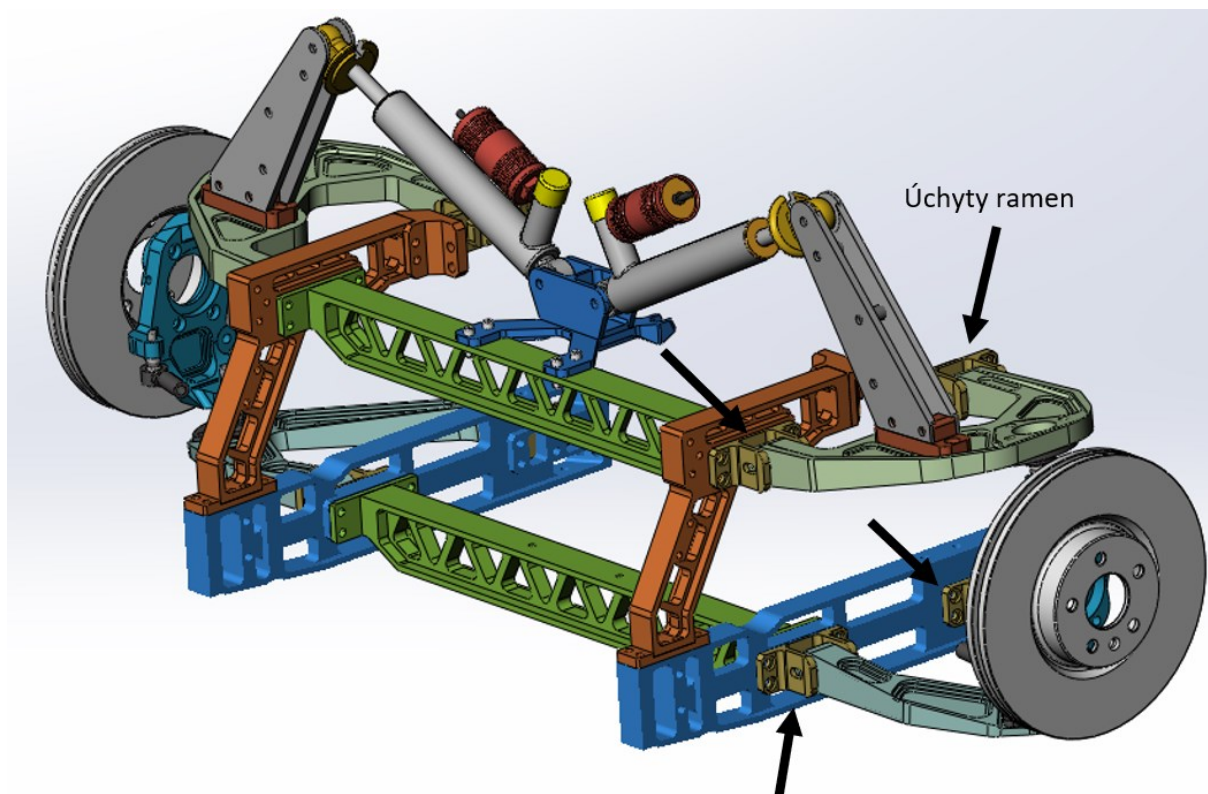
Pro měření sil ve šroubových spojích na automobilu Titan bylo nutné navrhnout ideální místo umístění tenzometrických podložek tak, aby v daném místě vznikaly co možná největší síly při jeho provozu, ale i při pouze statickém zatížení.

K dispozici byly celkem 4 tenzometrické podložky, 2 pro šroub M10 a 2 pro šroub M6. Rozložení těchto podložek muselo být navrženo a zváženo tak, aby v daném místě byly zaznamenány, pokud možno co největší hodnoty sil na každém z jednotlivých snímačů. Měření tenzometrů také stěžoval tvarový zámek na jednotlivých částech automobilu, a byli jsme tak omezení umístěním měřicích podložek. Tvarový zámek nedovolí přenést síly v ose x a z , síly z těchto směrů rozprostře do ploch v tvarovém zámku a na šroub tak bude působit pouze osová síla ve směru osy y .

Automobil obsahuje mnoho šroubových spojů, a ne každý spoj dokážeme analyticky vypočítat, proto umístění jednotlivých tenzometrů bylo v některých případech experimentální.

2.1 Umístění tenzometrických podložek pro šroub M10

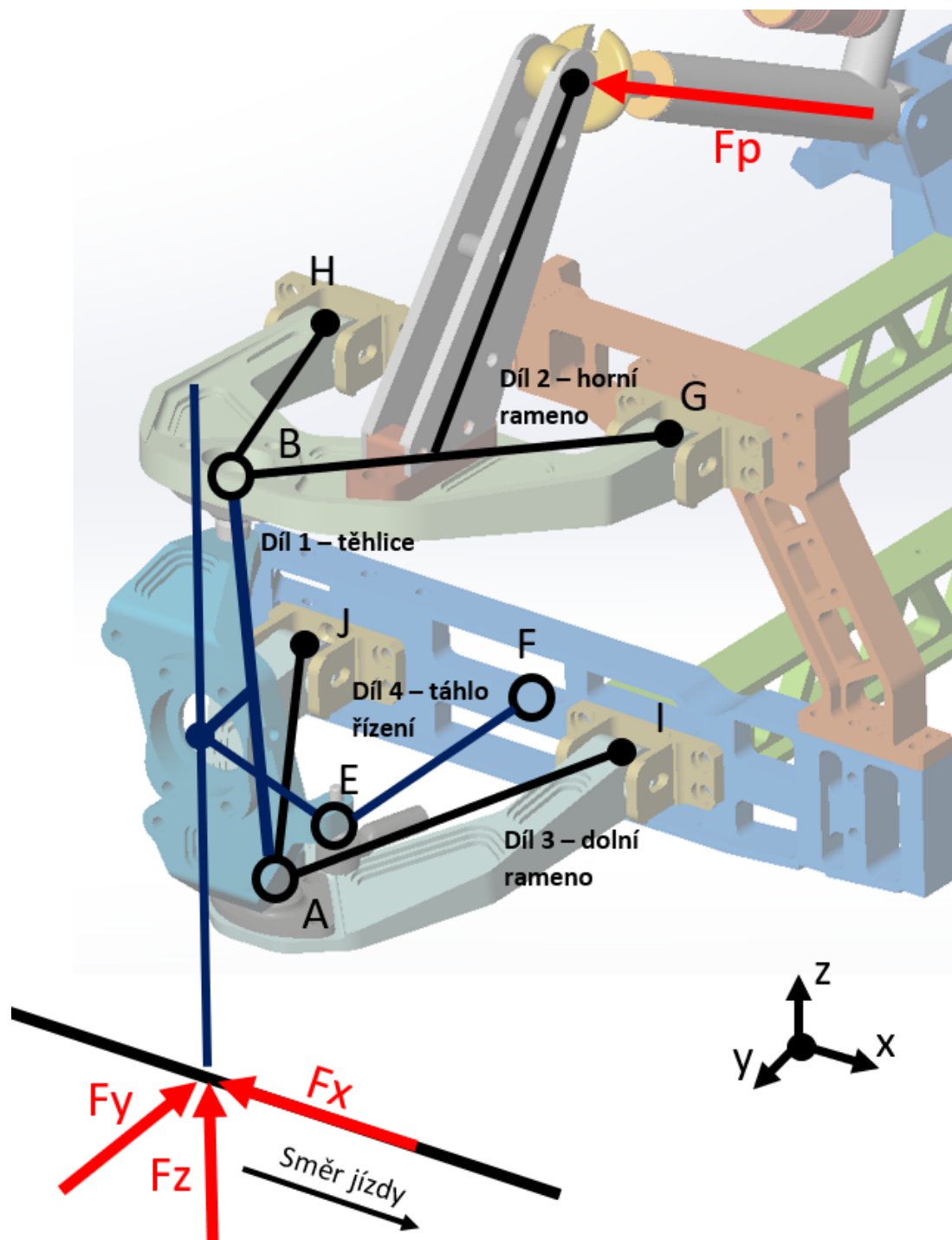
Jelikož největší síly působí na automobil od vozovky a všeobecně nejvíce namáhanou částí automobilu jsou nápravy, bylo rozhodnuto právě pro umístění tenzometrických podložek na šroubech úchytných jednotlivých ramen náprav. Na **Obr. 9** jsou šipkou označeny jednotlivé úchyty ramen náprav na automobilu Titan.



Obr. 9 Úchyty ramen náprav na automobilu Titan

2.1.1 Rozbor působících sil na nápravy

Pro stanovení sil, které působí na nápravy automobilu při různých jízdních stavech, se používají pohybové rovnice. Jelikož automobil bude testován statickými i provozními jízdními zkouškami, můžeme při výpočtech jednotlivých reakcí na úchyty uvažovat, že náprava tvoří tuhý celek. Na **Obr. 10** je naznačeno zjednodušení jednotlivých částí pro výpočet reakcí sil na úchyty náprav.



Obr. 10 Přehled působících sil na nápravu automobilu

Na nápravu při statickém zatížení působí několik sil. Síla F_p , představuje sílu působící od pružiny s tlumičem. Tato síla by se při statické zkoušce měla měnit při každé změně zatížení automobilu (například nastoupením a vystoupením posádky vozidla, přidáním zavazadla atd.).

Další silou je svislá síla F_z od vozovky, která působí v ose z na kolo automobilu. Jako další sílu při výpočtech použijeme brzdnu síla F_x , která sice při statických zkouškách na nápravu nepůsobí, ale bude použita pro mezní stav brzdění automobilu, proto ji dosadíme do rovnic rovnováhy. Síla F_x rovněž působí od vozovky na kolo automobilu. Jako poslední je boční síla F_y , která rovněž na automobil při statickém zatížení nepůsobí, avšak je zahrnuta pro další výpočty při různých mezních stavech.

Pro usnadnění výpočtu si nápravu můžeme rozložit na 4 části – na těhlici, horní rameno, dolní rameno a táhlo řízení. Úchyty jednotlivých ramen jsou na **Obr. 10** označeny písmeny G , H pro horní rameno, a I , J pro dolní rameno. Pro každý úchyt budeme počítat 3 reakce, a to v ose x , y a z . Body A a B jsou pak označeny kulové čepy v těhlici, které jsou rovněž velice důležité, jelikož přenášejí síly od vozovky dále na ramena náprav. Dalším dílem je táhlo řízení, které zajišťuje stabilitu těhlice a stará se rovněž o samotné řízení automobilu. Kulové čepy táhla řízení pak tvoří body E a F .

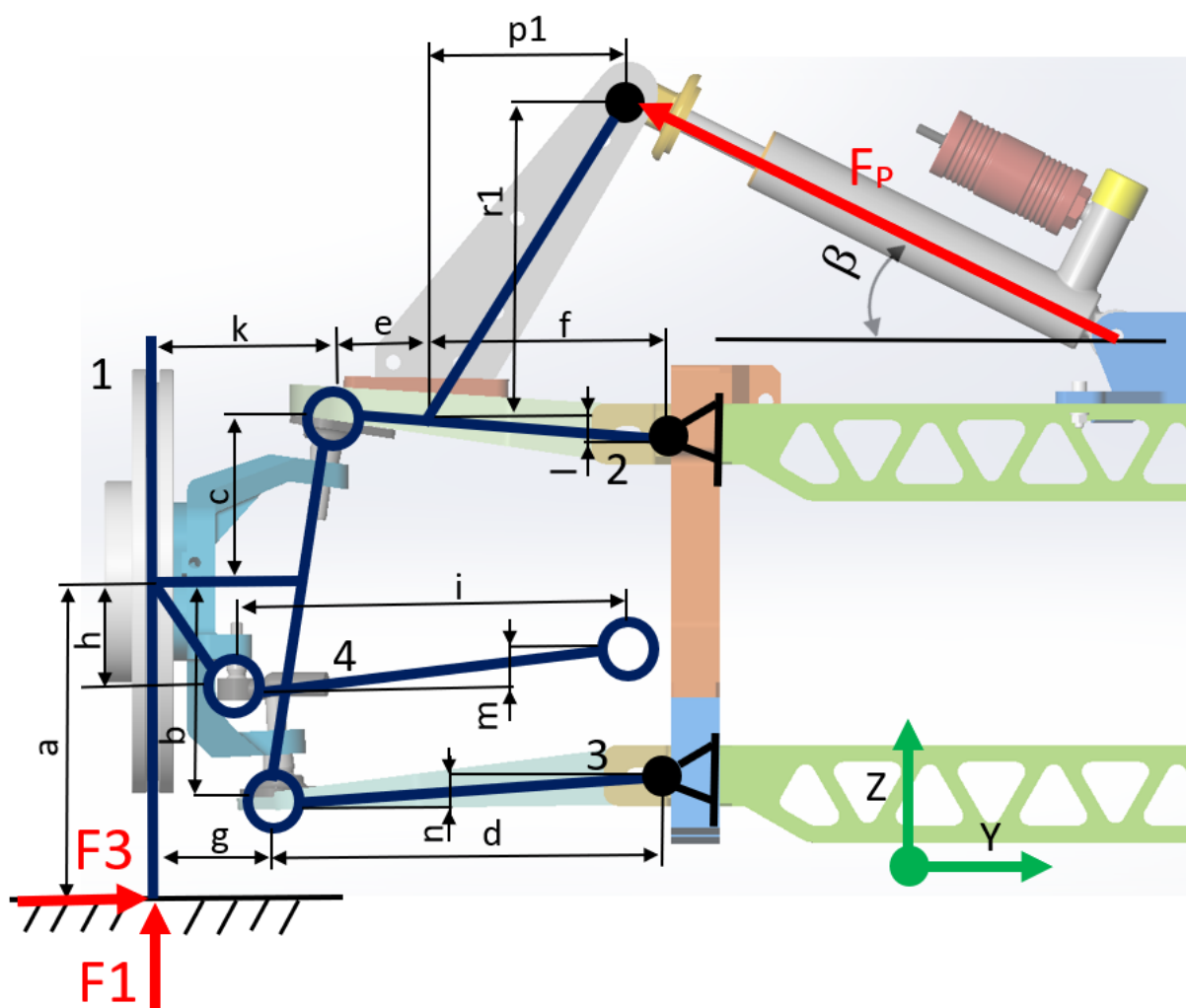
Abychom mohli vypočítat všechny reakce ve všech směrech na úchyty náprav, je nutné vytvořit rovnice rovnováhy ve třech pohledech na nápravu, a to zepředu, z boku a shora. Každý pohled nám pomůže vypočítat reakce v jiném směru osy.

Jednotlivé rovnice rovnováhy by se pak sobě měly rovnat. Při výpočtu postupujeme postupným dosazováním jednotlivých neznámých do rovnic a následným dosazením do dalšího dílu nápravy. Nakonec získáme reakce ve všech směrech všech bodů.

Pohled zepředu

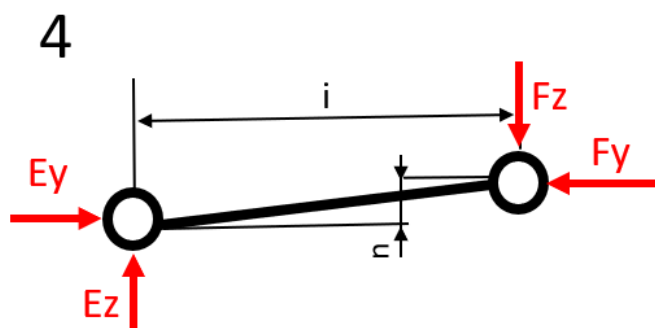
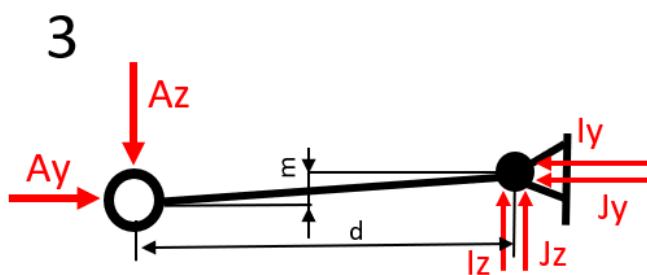
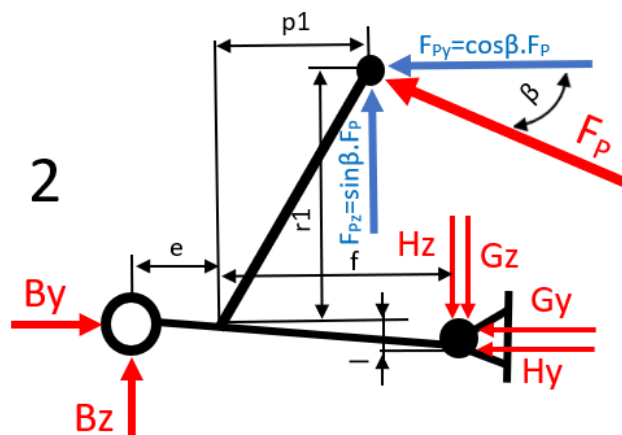
Na **Obr. 11** jsou zjednodušeně do modelu reálné nápravy implementovány síly a důležité rozměry pro stanovení rovnic rovnováhy. Při pohledu zepředu jsme schopni určit reakce sil působící ve směru y a z . Jelikož se jednotlivé úchyty ramen v pohledu zároveň překrývají, budou úchyty náprav označeny oběma body, a to G, H pro horní rameno, a I, J pro dolní rameno. Protože ramena nejsou symetrická, není možné tyto body nahradit pouze jedním písmenem.

Při pohledu zepředu na nápravu působí 3 síly. Svislá síla $F1$ (F_z), která působí od vozovky na kolo automobilu, boční síla $F3$ (F_y), která se ovšem při statických zkouškách bude rovnat nule, a síla Fp působící od pružiny s tlumičem na horní rameno. Síla Fp je rozložena pro usnadnění výpočtu na 2 složky sil, a to F_{py} a F_{pz} .



Obr. 11 Zjednodušení náprav – pohled zepředu

The diagram shows a mechanical system. A vertical bar, labeled '1' at its top, is fixed to a horizontal base. At the base, there is a vertical reaction force F_1 pointing upwards and a horizontal reaction force F_3 pointing to the right. A horizontal force F_2 is applied to the bar at a height a from the base, pointing to the right. A horizontal distance k is marked from the vertical bar to the top of a bent member. The bent member consists of two segments. The first segment is vertical, with a length c from the top joint to the middle joint. A horizontal force B_y is applied to this segment at the top joint, pointing to the left. A vertical force B_z is applied to this segment at the top joint, pointing downwards. The second segment of the bent member is inclined, with a horizontal projection j and a vertical projection b from the middle joint to the bottom joint. A horizontal force E_y is applied to this segment at the middle joint, pointing to the left. A vertical force E_z is applied to this segment at the middle joint, pointing downwards. At the bottom joint, there is a horizontal reaction force A_y pointing to the left and a vertical reaction force A_z pointing upwards. A horizontal distance g is marked from the vertical bar to the bottom joint. A horizontal distance h is marked from the base to the point where the horizontal force F_2 is applied.



19

Rovnice rovnováhy pro jednotlivé části nápravy při pohledu zepředu:

Díl 1 (těhlice)

$$\sum F_{iy} = 0 = F_3 - A_y + B_y + E_y \quad (24)$$

$$\sum F_{iz} = 0 = F_1 + A_z - B_z - E_z \quad (25)$$

$$\sum M_{iA} = 0 = F_3 \cdot (a - b) - F_1 \cdot g - B_z \cdot (k - g) + B_y \cdot (b + c) + E_y \cdot (b - h) + E_z \cdot (g - j) \quad (26)$$

Díl 2 (horní rameno)

$$\sum F_{iy} = 0 = H_y + G_y + F_p \cdot \cos\beta - B_y \quad (27)$$

$$\sum F_{iz} = 0 = B_z - G_z - H_z - F_p \cdot \sin\beta \quad (28)$$

$$\sum M_{iG,H} = 0 = -B_z \cdot (e + f) - B_y \cdot l + F_p \cdot \cos\beta \cdot (r_1 + l) - F_p \cdot \sin\beta \cdot (f - p_1) \quad (29)$$

Díl 3 (spodní rameno)

$$\sum F_{iy} = 0 = I_y + J_y - A_y \quad (30)$$

$$\sum F_{iz} = 0 = I_z + J_z - A_z \quad (31)$$

$$\sum M_{iL,J} = 0 = A_y \cdot m - A_z \cdot d \quad (32)$$

Díl 4 (táhlo řízení)

$$\sum F_{iy} = 0 = E_y - F_y \quad (33)$$

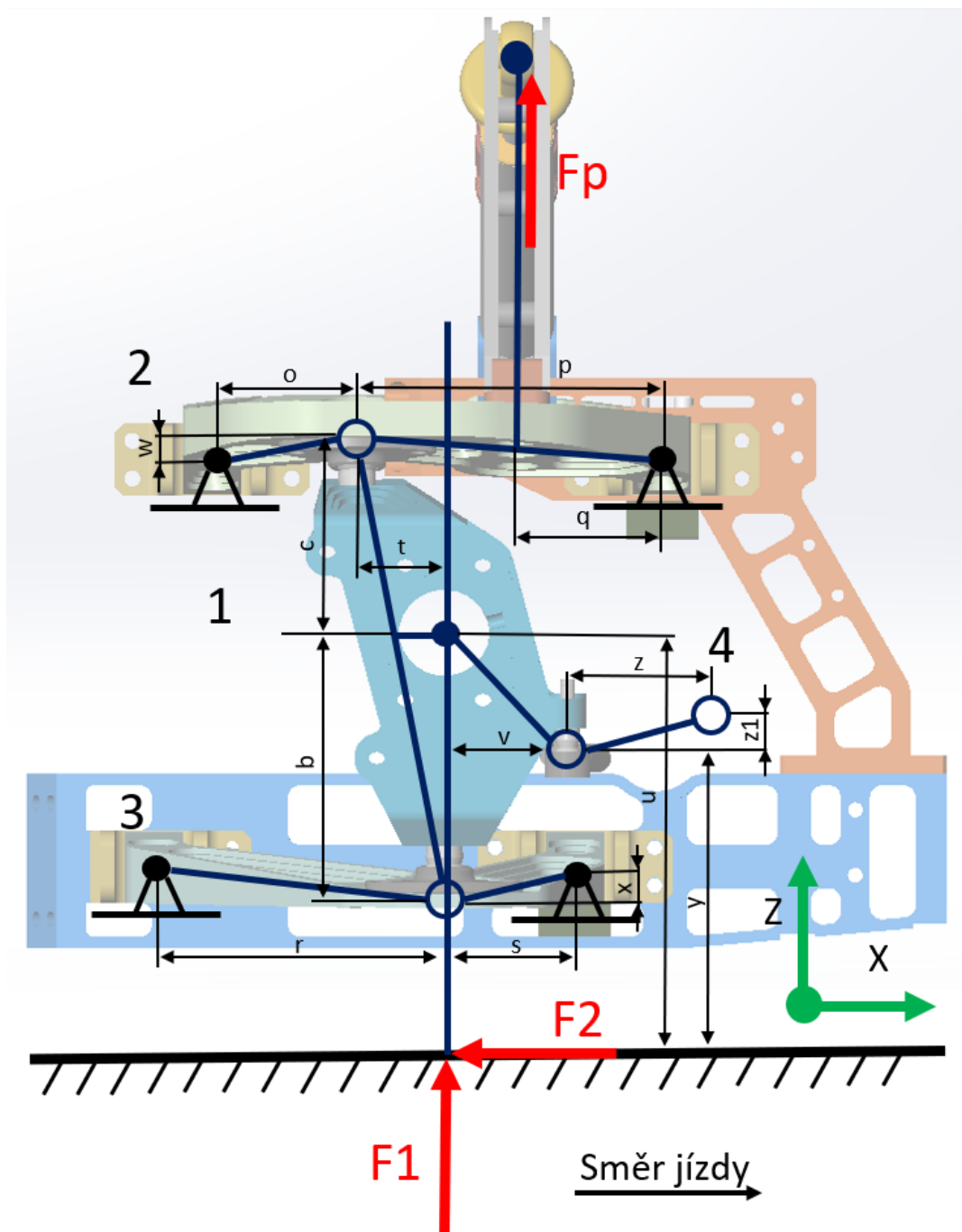
$$\sum F_{iz} = 0 = -E_z + F_z \quad (34)$$

$$\sum M_{iE} = 0 = -F_z \cdot i + F_y \cdot n \quad (35)$$

Pohled z boku

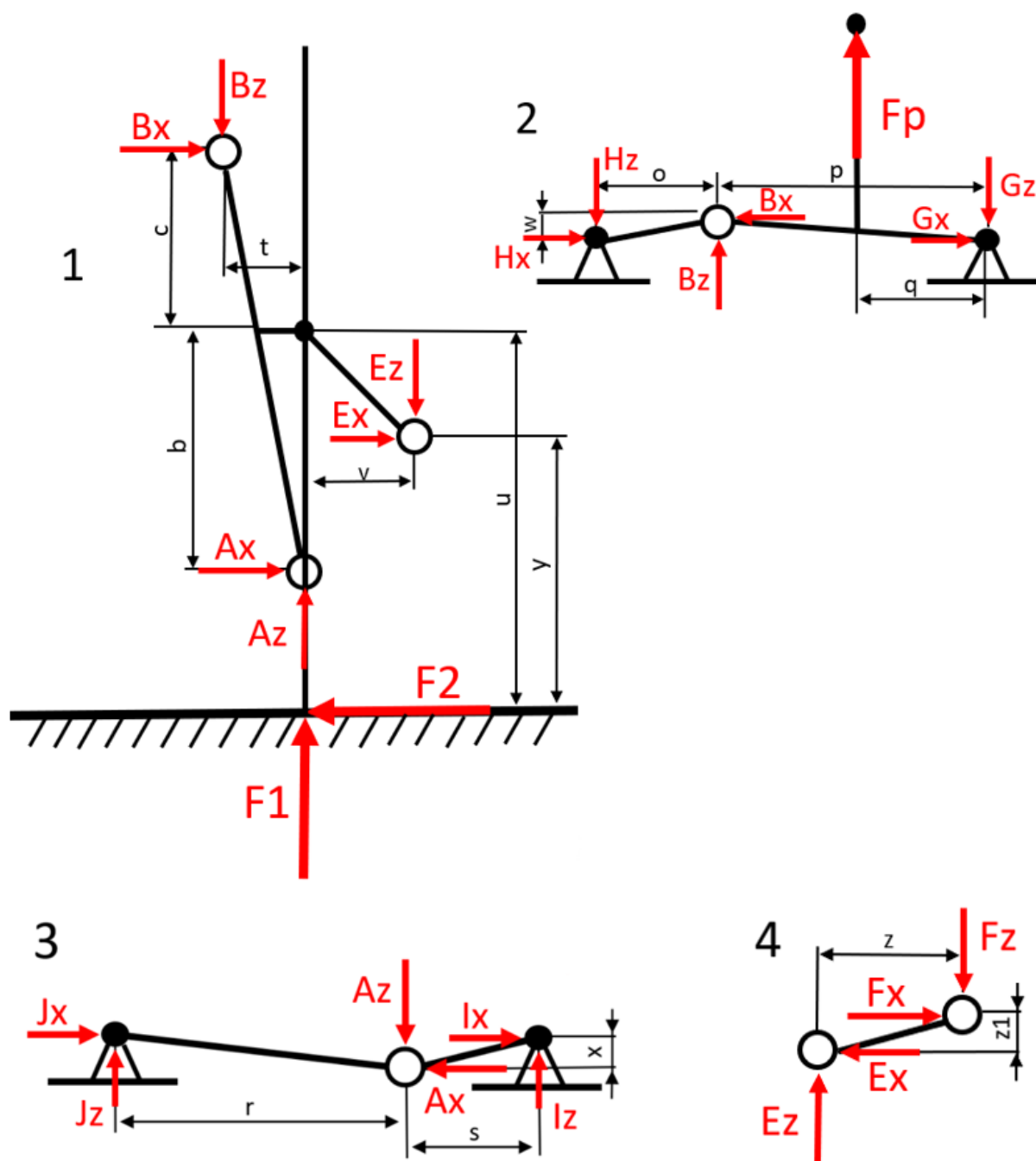
Při pohledu z boku určíme reakce ve směru osy x a z . V pohledu z boku na nápravu automobilu působí 3 síly. Svislá síla $F1$ od vozovky, síla Fp a brzdná síla $F2$, která rovněž působí od vozovky.

Zde již lze vytvořit rovnice rovnováhy pro jednotlivé úchyty ramen označené písmeny G a H pro horní rameno a písmeny I a J pro dolní rameno. Na **Obr. 13** je zobrazeno zjednodušení jednotlivých částí nápravy a vkreslení do 3D modelu nápravy.



Obr. 13 Zjednodušení náprav – pohled z boku

Na **Obr. 14** je náprava rozdělena na 4 části při pohledu z boku.



Obr. 14 Rozložení na obrazce při pohledu z boku

Rovnice rovnováhy pro jednotlivé části nápravy při pohledu z boku:

Díl 1 (těhlice)

$$\sum F_{ix} = 0 = F_2 - A_x - B_x - E_x \quad (36)$$

$$\sum F_{iz} = 0 = F_1 + A_z - B_z - E_z \quad (37)$$

$$\sum M_{iA} = 0 = -B_x \cdot (b + c) + B_z \cdot t - F_2 \cdot (u - b) - E_x \cdot (y - b) - E_z \cdot v \quad (38)$$

Díl 2 (horní rameno)

$$\sum F_{ix} = 0 = B_x - H_x - G_x \quad (39)$$

$$\sum F_{iz} = 0 = F_p - H_z + B_z - G_z \quad (40)$$

$$\sum M_{iB} = 0 = F_p \cdot (p - q) - G_z \cdot p + G_x \cdot w - H_x \cdot w + H_z \cdot o \quad (41)$$

Díl 3 (spodní rameno)

$$\sum F_{ix} = 0 = A_x - J_x - I_x \quad (42)$$

$$\sum F_{iz} = 0 = A_z + J_z + I_z \quad (43)$$

$$\sum M_{iA} = 0 = I_z \cdot s - I_x \cdot x - J_x \cdot x - J_z \cdot r \quad (44)$$

Díl 4 (táhlo řízení)

$$\sum F_{ix} = 0 = E_x - F_x \quad (45)$$

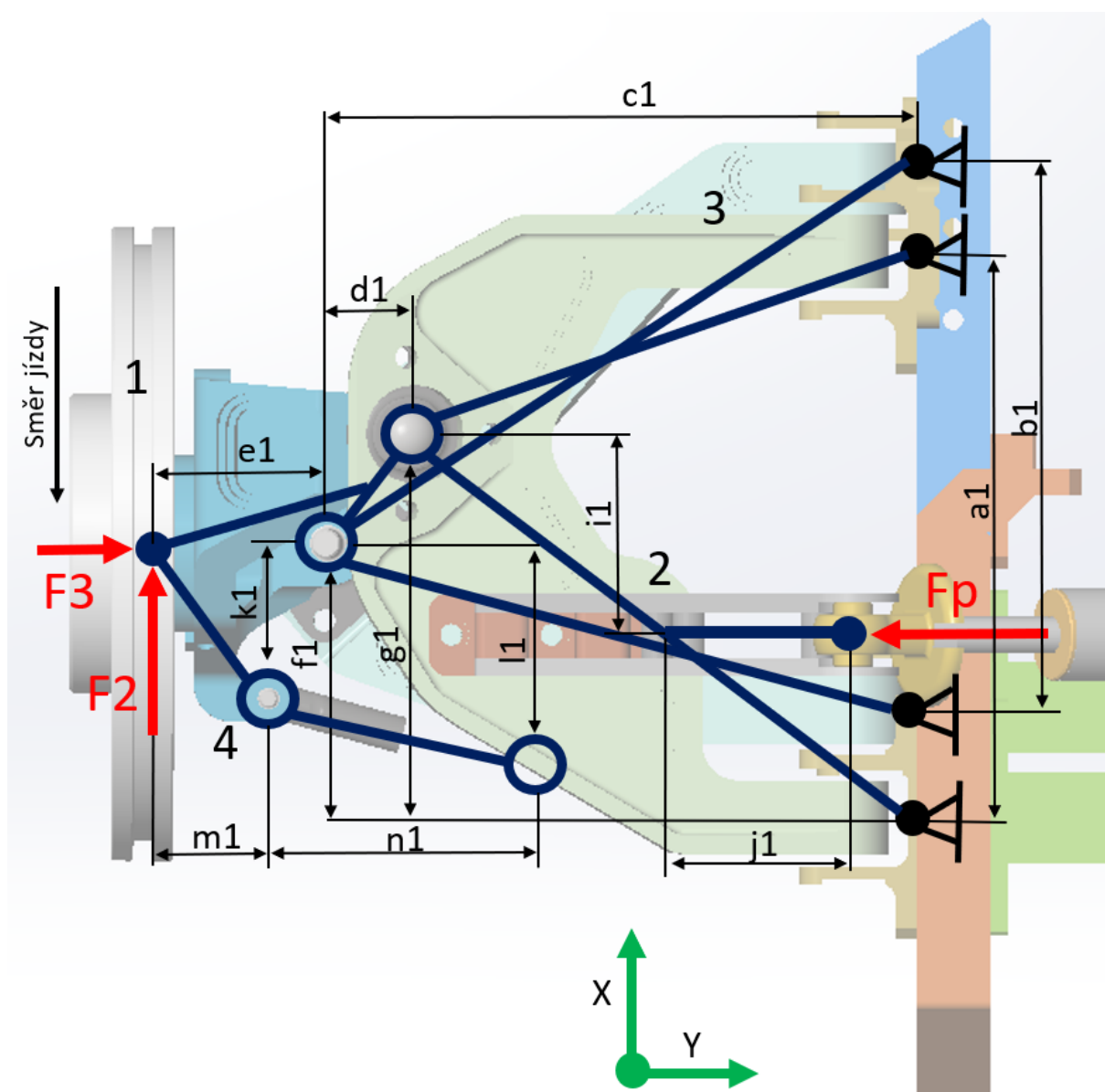
$$\sum F_{iz} = 0 = E_z - F_z \quad (46)$$

$$\sum M_{iE} = 0 = -F_x \cdot z_1 - F_z \cdot z \quad (47)$$

Pohled shora

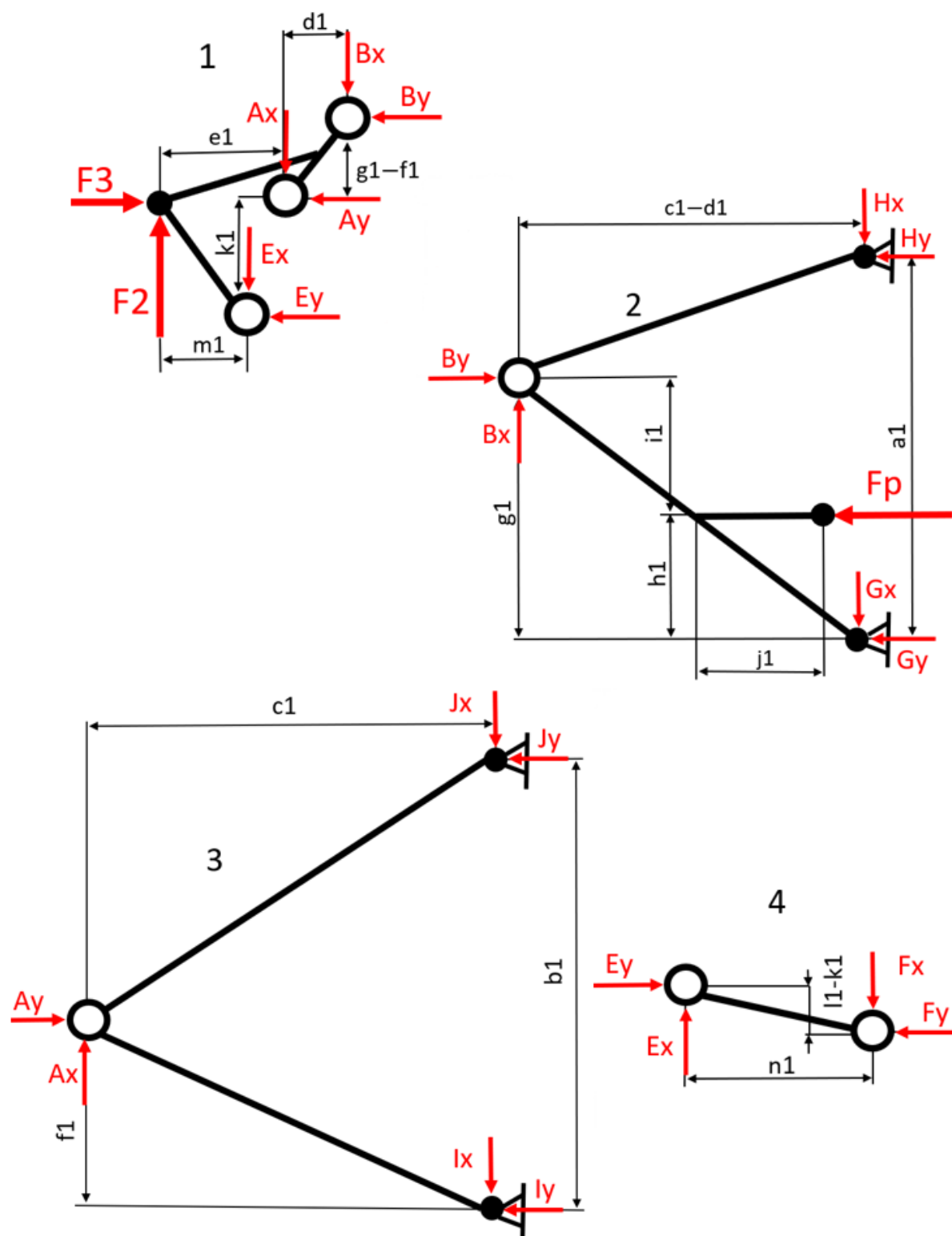
Při pohledu shora určíme reakce ve směru osy x a y . Na **Obr. 15** lze vidět, že při pohledu shora na nápravu působí brzdná síla F_2 , která působí proti směru vozidla, dále boční síla F_3 a síla od tlumiče s pružinou F_p .

Díky tomuto pohledu lze vypočítat chybějící reakci ve směru osy y na jednotlivé úchyty ramen. Pro správné určení a ověření jednotlivých reakcí je důležité, aby se jednotlivé rovnice v rozdílných pohledech sobě rovnaly. To znamená, že například rovnice pro díl těhlice bude ve všech pohledech a ve stejném směru působení sil totožná.



Obr. 15 Zjednodušení náprav – pohled shora

Na **Obr. 16** je náprava rozdělena na 4 části při pohledu shora.



Obr. 16 Rozložení na obrazce při pohledu shora

Rovnice rovnováhy pro jednotlivé části nápravy při pohledu shora:

Díl 1 (těhlice)

$$\sum F_{ix} = 0 = F_2 - A_x - B_x - E_x \quad (48)$$

$$\sum F_{iy} = 0 = -F_3 + A_y + B_y + E_y \quad (49)$$

$$\sum M_{iA} = 0 = -F_2 \cdot e_1 - B_x \cdot d_1 + B_y \cdot (g_1 - f_1) + E_x \cdot (e_1 - m_1) - E_y \cdot k_1 \quad (50)$$

Díl 2 (horní rameno)

$$\sum F_{ix} = 0 = B_x - H_x - G_x \quad (51)$$

$$\sum F_{iy} = 0 = F_p - B_y + H_y + G_y \quad (52)$$

$$\sum M_{iB} = 0 = -H_y \cdot (a_1 - g_1) + H_x \cdot (c_1 - d_1) + F_a \cdot i_1 - G_y \cdot g_1 + G_x \cdot (c_1 - d_1) \quad (53)$$

Díl 3 (spodní rameno)

$$\sum F_{ix} = 0 = A_x - J_x - I_x \quad (54)$$

$$\sum F_{iy} = 0 = -A_y + J_y + I_y \quad (55)$$

$$\sum M_{iA} = 0 = J_y \cdot (b_1 - f_1) - J_x \cdot c_1 - I_y \cdot f_1 - I_x \cdot c_1 \quad (56)$$

Díl 4 (táhlo řízení)

$$\sum F_{ix} = 0 = F_x - E_x \quad (57)$$

$$\sum F_{iy} = 0 = F_y - E_y \quad (58)$$

$$\sum M_{iE} = 0 = -F_y \cdot (l_1 - k_1) - F_x \cdot n_1 \quad (59)$$

2.1.2 Předpokládané působící síly na nápravy

V předchozí kapitole byly analyticky určeny síly, které působí na nápravu automobilu. Z rovnovážných rovnic byly postupným dosazováním získány všechny hodnoty reakcí ve všech směrech. Z rovnic rovnováhy byly vytvořeny matice a pomocí Gaussovy eliminační metody vypočteny všechny neznámé. Tyto hodnoty pak poslouží jako vstupní data pro výpočet samotného šroubového spoje.

V potaz budou brány hodnoty reakcí ve směru osy y , jelikož šrouby v úchytech ramen spojují úchyty s rámem právě v ose y , tedy v ose šroubu, kde vzniká největší síla (osová síla šroubu). Ostatní reakce ve směru osy x a z se do šroubového spoje nijak nepromítnou díky již zmíněnému tvarovému zámku jednotlivých dílů.

Určení sil působících na nápravu

Na nápravu automobilu, jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, působí několik sil. Jelikož všechny síly nepůsobí při různých jízdních stavech, není nutné všechny síly zahrnout do výpočtu. Některé síly jednoduše nejdou při statických zkouškách nasimulovat, ale tyto síly se mohou následně hodit pro možné dynamické jízdní zkoušky.

Svislá síla $F1$

Svislá síla $F1$ působí od vozovky na jednotlivá kola vozidla. Tato síla se získá hmotností vozidla vynásobenou gravitačním zrychlením. Pro zjednodušení předpokládáme, že poměr váhy na přední a zadní nápravě a pravé a levé straně vozidla je 50/50, svislá síla tedy bude na každém jednotlivém kole stejná.

V praxi však hodnoty sil působících svisle na kola nejsou vždy tak jednoduše určitelné. Žádný automobil není ideálně váhově rozložen, proto se pro získání přesnějších hodnot využívá takzvaných nápravových vah.

Pro naše výpočty vycházíme z hmotnosti automobilu 1 500 kg. Výsledná svislá síla na jednotlivé kolo je tedy $F1 = 3\,679\text{ N}$. Tato hodnota však platí pouze v takzvaném klidném stavu, kdy je automobil zatěžován pouze svou vlastní tíhou. Při každé změně hmotnosti automobilu, ať jde o nastoupení posádky, nebo přidání zavazadla, se tato svislá síla změní.

Brzdná síla $F2$

Brzdná síla $F2$ působí rovněž od vozovky na kolo automobilu a vychází ze vztahu hmotnosti vozidla vynásobenou zrychlením. Tato síla vzniká brzděním automobilu a je zaznamenávána snímačem zrychlení, který zaznamenává hodnotu zrychlení g , pro další výpočty je tato hodnota převedena na zrychlení a .

Jelikož je náprava podrobena pouze statickým výpočtům, je tato síla ve výpočtech rovna nule. Tuto sílu při jízdních zkouškách získáme například bržděním vozidla

Boční síla F_3

Boční síla, v tomto případě označena F_3 , působí rovněž od vozovky na kola automobilu. V klidném stavu, kdy je automobil zatěžován pouze vlastní tíhou, tato síla nepůsobí. Při statických zkouškách není tedy tuto sílu možné nijak nasimulovat. Tato síla působí na automobil například při průjezdu zatáčkou. I měření této síly zprostředkovává snímač zrychlení, který zaznamenává zrychlení g .

Síla F_p od tlumiče s pružinou

Síla od tlumiče s pružinou bude při zkouškách, kdy je automobil zatěžován pouze vlastní tíhou velice malá, a hodnoty síly se budou rovnat hmotnosti nápravy. Síla F_p , která působí od tlumiče s pružinou, se vypočte ze vztahu tuhost pružiny vynásobena zdvihem tlumiče.

Při reálných jízdních zkouškách bude tlumič s pružinou vybaven snímačem zdvihu kol a budeme mít tak přesnou představu o velikosti této síly.

Hodnoty sil na úchytech náprav

Hodnoty jednotlivých sil byly dosazovány ve 3 různých stavech. Prvním stavem je takzvaný rovnovážný stav, kdy na nápravy automobilu působí pouze svislá síla F_I a v malé míře síla F_p od tlumiče.

Dalším stavem je zvýšení hodnoty sil F_I a F_p . Zvýšení sil dosáhneme zatížením vozidla, konkrétně přidáním závaží do automobilu, a to bude mít za následek právě nárůst těchto sil.

Posledním stavem je přidání boční síly F_3 . Tuto sílu při statických zkouškách není možné nijak nasimulovat, ale právě tato síla ovlivní reakce ve směru osy y nejvíce. V praxi tuto sílu získáme například při průjezdu zatáčkou. V následující **Tab. 1** jsou zaznamenány hodnoty reakcí na úchyty náprav při různých působících silách v ose y .

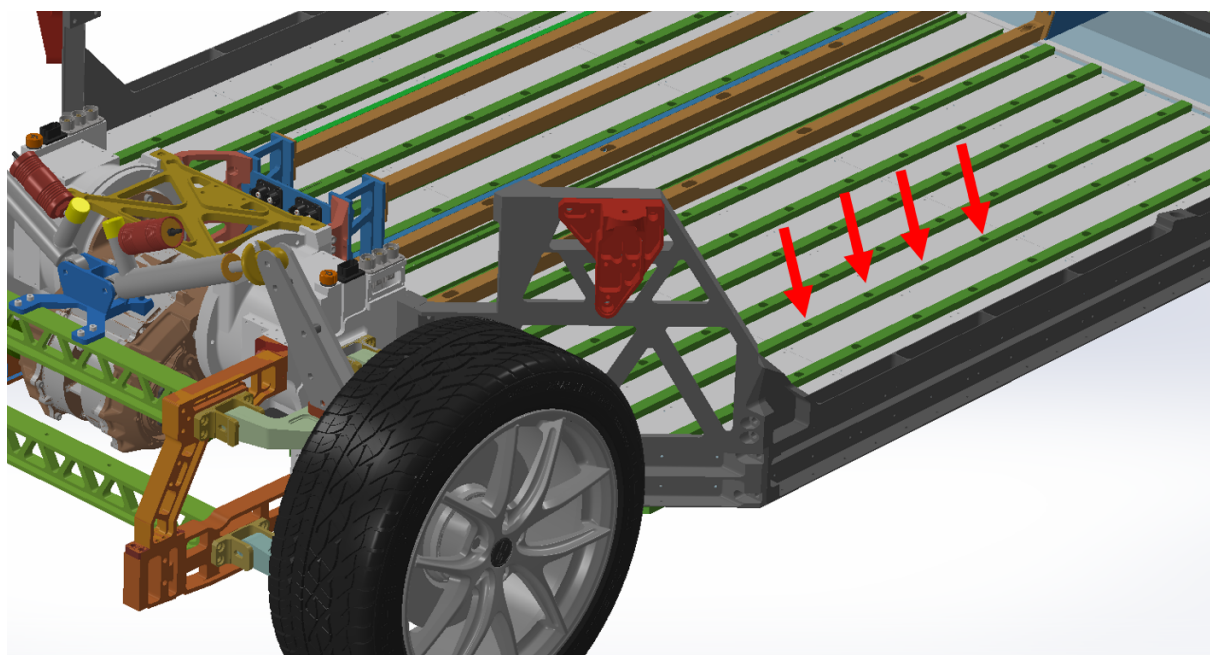
Tab. 1 Hodnoty reakcí v ose y pro úchyty ramen náprav

	G_y	H_y	I_y	J_y
Rovnovážný stav	5992 N	4856 N	3522 N	3261 N
Zatížení (+200kg)	6125 N	5003 N	3625 N	3459 N
Boční síla ($F_y=2000$ N)	7253 N	6531 N	4963 N	4752 N

Z **Tab. 1** vyplývá, že hodnoty reakcí pro G jsou ve všech stavech jednoznačně největší. Proto bude pro další výpočty počítáno právě s touto hodnotou. Z tabulky také vyplývá umístění tenzometrických podložek, ty budou umístěny právě na úchyty představující bod G .

2.2 Umístění tenzometrických podložek pro šroub M6

Umístění tenzometrických podložek nebylo v případě podložek pod šroub M6 tak jednoznačné jako v případě podložek pro šroub M10 na nápravách. Šroubový spoj se šroubem M6 se objevoval pouze na podlaze automobilu a měl spojovat jednotlivé bateriové moduly v jeden celek a tvořit tak bateriový box. Určení míst pro umístění podložek by tak bylo jasné, ovšem z těchto míst nejsme schopni určit předpokládané síly, které budou na šroubový spoj působit, a v praxi se příliš nedoporučuje měřit místo, kde nelze předpovídat výsledek. Umístění tenzometrických podložek pro šroub M6 znázorňují šipky na **Obr. 17**.



Obr. 17 Umístění tenzometrů pro šroub M6 na battery boxu

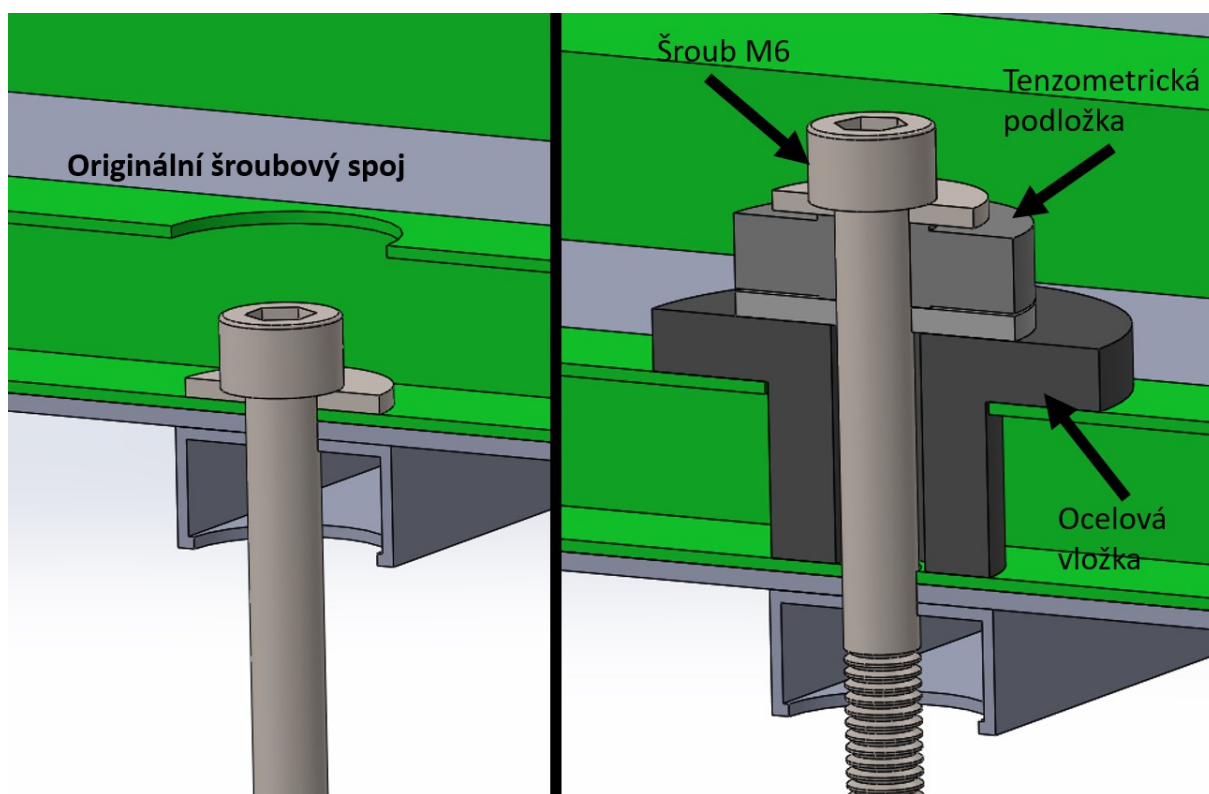
Můžeme předpokládat, že by se šrouby na bateriovém boxu mohly během zkušebních jízd rozkmitat a samovolně se tak uvolnit. Při známém utahovacím momentu šroubu a známé síle předpětí ve šroubu budeme pomocí tenzometrické podložky schopni během jízdních zkoušek naměřit, zda náhodou nedojde k překročení meze minimálního předpětí šroubu a šroub se tak samovolně díky vibracím uvolní.

Dalším možným výsledkem je samovolné uvolnění šroubu během krutu karoserie. Tento krut karoserie může nastat například při extrémním vyhýbacím manévru. Pro tento případ budou tenzometrické podložky umístěny diagonálně naproti sobě, kdy bude každá z nich na vzdálenějším konci karoserie.

2.2.1 Výroba vložky pro měření tenzometrickou podložkou

Šroub držící bateriové moduly byl v obalu držící právě tyto moduly zapuštěn, jak je vidět na **Obr. 18** vlevo, a umístění tenzometrické podložky tak nebylo možné, jelikož její vnější průměr byl větší než otvor v profilu.

Proto bylo zapotřebí vyrobení speciální ocelové vložky s osazením, která přenesla síly šroubu a bude tak možné umístit tenzometr. Ocelová vložka musí být co možná nejpřesněji vyrobena a zároveň dostatečně tuhá, aby se síly měřeného spoje nedeformovaly do této vložky. Na **Obr. 18** vpravo je znázorněna ocelová vložka v 3D modelu.



Obr. 18 Originální šroubový spoj (vlevo), Použití vložky pod tenzometr (vpravo)

Jelikož budou síly působící na šroubový spoj přeneseny výše, bude při měření s tenzometry zapotřebí použití delších šroubů, případně závitových tyčí. Při praktickém měření s tenzometry nejsou použity klasické podložky pod hlavou šroubu, ale jsou použity speciální podložky dodané přímo k tenzometrické podložce, které mají za úkol přenést síly do tenzometru.

2.3 Porovnání očekávaných hodnot s reálnými daty

V předchozí kapitole byly určeny očekávané hodnoty sil a možné stavy napětí, které by mohly při reálných podmínkách nastat. Pro ověření hodnot, které byly získány analyticky, se v praxi využívají jízdní zkoušky, u kterých jsme schopni tato data ověřit.

2.3.1 Jízdní zkoušky

Zkoušení vozidla můžeme rozdělit na zkoušení v laboratorních podmínkách, kdy simulujeme skutečné jízdní zkoušky a na zkoušky provozní, které jsou prováděné v reálných podmínkách, například na polygonu.

Z dalšího pohledu lze jízdní zkoušky rozdělit na zkoušky statické nebo dynamické. Mezi statické zkoušky patří například nadlehčování jednotlivých kol, naklápění automobilu pomocí zvedáku nebo zvyšování hmotnosti automobilu. Používanějšími zkouškami v praxi jsou však dynamické jízdní zkoušky, protože ke zkoušení dochází za skutečných podmínek. Mezi nejčastěji používané jízdní zkoušky patří dvojitá změna směru, fish hook, jízda po kružnici v ustáleném směru nebo přímá jízda s maximálním brzděním.

Provozní zkoušky jsou při vývoji automobilu a jeho částí velice důležité, protože dochází ke zkoušení za skutečných podmínek. K bezpečnému provedení jízdních zkoušek slouží zkušební dráhy takzvané polygon, na kterých je možno testovat vozidla na vozovkách s definovaným povrchem, co se týče sklonu nebo i materiálu. Na polygonech je možno realizovat krátkodobé zkoušky, eventuálně i dlouhodobé testy. **Obr. 19** zobrazuje pohled na zkušební polygon areálu Tatry.



Obr. 19 Letecký pohled na zkušební areál Tatry [11]

2.4 Výpočet šroubů M10 v úchytech ramen

Aby bylo možné určit působící síly ve šroubovém spojení, je důležité znát provozní sílu na jednotlivé šrouby. Hodnotu provozní síly F_p dává hodnota reakce ve směru osy y , která byla získána z rovnic rovnováhy v předchozí kapitole. Jelikož každý úchyt nápravy je ke karoserii vozu spojen celkem čtyřmi šrouby, je nutné tuto hodnotu vydělit čtyřmi. Tímto vztahem (rovnice 60) dostaneme hodnotu síly F_p na daný šroub. Hodnotu provozní síly F_p zvolíme z takzvaného rovnovážného stavu, kdy je velikost $F_p = 5\,992\text{ N}$.

$$F_p = \frac{F_{Pcel}}{i_s} = \frac{5992}{4} = 1498\text{ N} \quad (60)$$

F_{Pcel} – celková provozní síla [N]

i_s – počet šroubů

2.4.1 Tuhost šroubu

Pro výpočet tuhosti šroubu c_s je nutné rozdělit deformovatelnou část šroubu l_s na úseky se stejným průřezem S_s , jelikož šroub nemá po celé své deformační délce stejný průřez. Tuhosti jednotlivých částí šroubu pak řadíme sériově za sebe. Pro výpočet tuhosti šroubu se volí hodnota $E = 200\,000\text{ MPa}$. Tuhost jednotlivých částí šroubu vypočteme ze vztahu:

$$c_s = tga = \frac{E \cdot S_s}{l_s} \quad (61)$$

c_s – tuhost šroubu [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$]

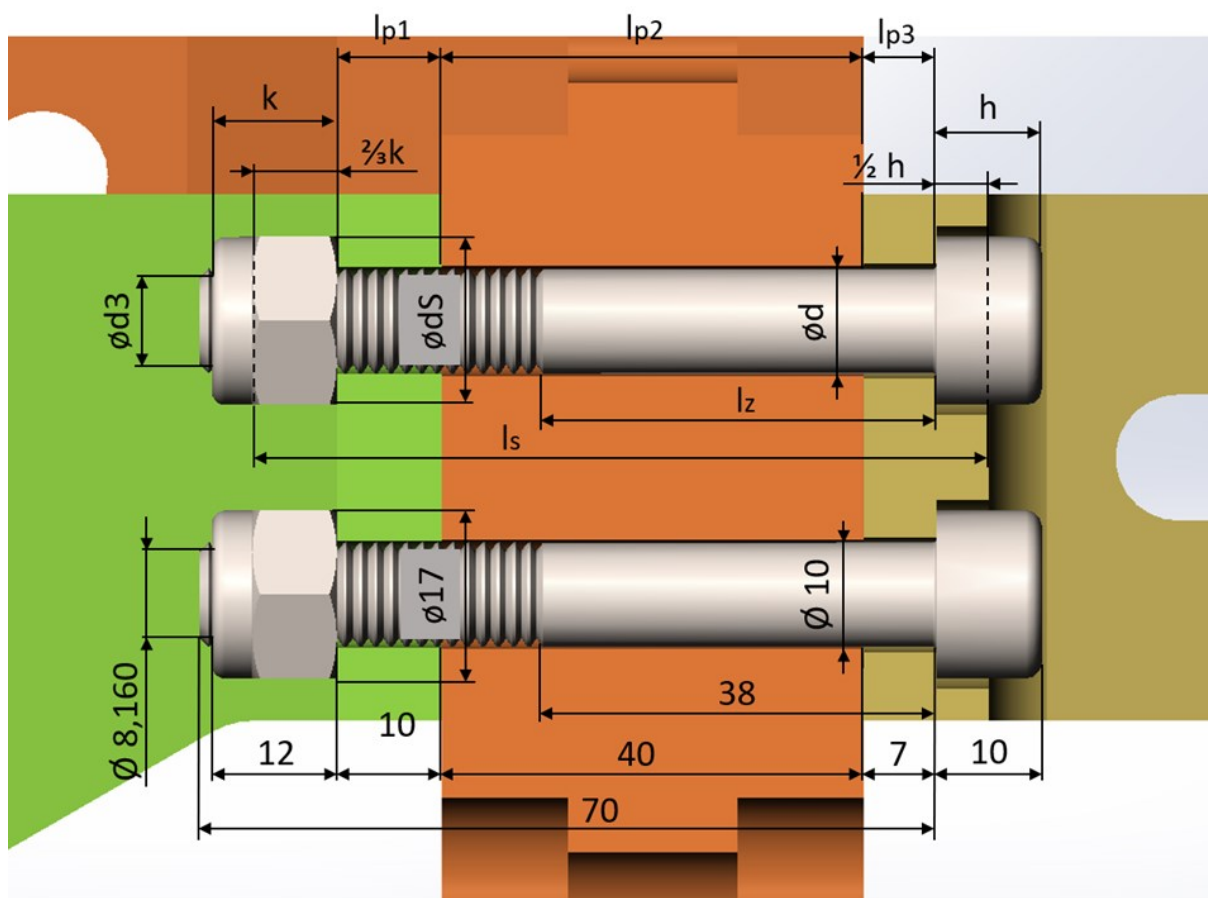
E – modul pružnosti v tahu [MPa]

S_s – průřez šroubu [mm^2]

l_s – deformační délka šroubu [mm]

Deformační délky částí šroubu

Na následujícím **Obr. 20** jsou u horního šroubu naznačeny písmeny jednotlivé rozměry šroubu a na spodním šroubu již samotné hodnoty.



Obr. 20 Schéma rozměrů šroubu M10 použitých na úchytu ramen náprav

Deformační délka 1. části šroubu:

$$l_{s1} = \frac{1}{2}h + l_z = \frac{1}{2} \cdot 10 + 38 = 43 \text{ mm} \quad (62)$$

Deformační délka 2. části šroubu:

$$l_{s2} = l_{p1} + l_{p2} + l_{p3} - l_z + \frac{2}{3}k = 10 + 40 + 7 - 38 + \frac{2}{3} \cdot 12 = 27 \text{ mm} \quad (63)$$

l_{s1} – první deformační část šroubu [mm]

l_{s2} – druhá deformační část šroubu [mm]

l_z – vzdálenost mezi podložkou a závitem [mm]

h – výška hlavy šroubu [mm]

k – výška matice [mm]

$L_{p1,2,3}$ – délka příruby [mm]

Tuhost 1. části šroubu:

$$c_{S1} = \frac{E \cdot S_1}{l_{S1}} = \frac{E \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot l_{S1}} = \frac{200000 \cdot \pi \cdot 10^2}{4 \cdot 43} = 365301 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (64)$$

Tuhost 2. části šroubu:

$$c_{S2} = \frac{E \cdot S_2}{l_{S2}} = \frac{E \cdot \pi \cdot d_3^2}{4 \cdot l_{S2}} = \frac{200000 \cdot \pi \cdot 8,160^2}{4 \cdot 27} = 387379 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (65)$$

Výsledná tuhost šroubu:

$$C_S = \frac{1}{\frac{1}{c_{S1}} + \frac{1}{c_{S2}}} = \frac{1}{\frac{1}{365301} + \frac{1}{387379}} = 188008 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (66)$$

$c_{S1,2}$ – tuhost částí šroubu [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$]

c_s – výsledná tuhost šroubu [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$]

$S_{l,2}$ – průřezy částí šroubu [mm^2]

2.4.2 Tuhost příruby

Deformovaná část přírub je ve tvaru Bachova komolého dvojkužele a při výpočtu se vždy zanedbávají podložky. Tento komolý dvojkužel je převeden na trubku konstantního průřezu, viz kapitola 1.1.4.

Výpočet redukovaného průměru:

Průměr pod maticí, vytváří spolu s průměrem díry komolý dvojkužel a je v tomto případě roven rozměru s matice.

$$d_{RED} = d_s + \frac{l_{P1} + l_{P2} + l_{P3}}{2} \cdot \text{tg} \alpha = 17 + \frac{10 + 40 + 7}{2} \cdot \text{tg} 45^\circ = 45,5 \text{ mm} \quad (67)$$

d_s – průměr dotyku pod maticí [mm]

Výpočet deformačního průřezu přírub:

$$S_P = \frac{\pi \cdot (d_{RED}^2 - d_D^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (45,5^2 - 10^2)}{4} = 1547,4 \text{ mm}^2 \quad (68)$$

d_D – vnitřní průměr dotyku matice [mm]

Výpočet výsledné tuhosti přírub:

Pro výpočet tuhosti příruby se volí hodnota $E = 71\,000$ MPa, jelikož se jedná o hliníkovou slitinu.

$$c_P = \frac{E \cdot S_p}{l_{P1} + l_{P2} + l_{P3}} = \frac{71000 \cdot 1547,4}{57} = 1927463,2 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (69)$$

c_P – výsledná tuhost přírub [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$]

S_p – průřez příruby [mm^2]

Poměr tuhostí přírub a šroubů:

$$\frac{c_P}{c_S} = \frac{1927463}{188008} = 10,25 \quad (70)$$

2.4.3 Výpočet sil působících na šroub:

Pro šroubový spoj a vyvození jeho předpětí musí platit podmínka těsnosti spojení. To znamená, že minimální síla v přírubách při zatížení provozní silou musí být větší než nula. Hodnota této síly je pak dána součinitelem těsnosti. Jelikož na spoj nejsou kladeny žádné vysoké nároky na těsnost, byla zvolena hodnota součinitele těsnosti $\psi_T = 0,5$.

Výpočet minimální síly v přírubě:

$$F_{P\check{r}min} = F_P \cdot \psi_T = 1498 \cdot 0,5 = 749 \text{ N} \quad (71)$$

$F_{P\check{r}min}$ – minimální síla v přírubě [N]

ψ_T – součinitel těsnosti spojení

F_P – síla provozní [N]

Výpočet minimální síly ve šroubu:

$$F_{Smin} = F_O = F_{P\check{r}min} + F_P \cdot \frac{c_P}{c_S + c_P} = 749 + 1498 \cdot \frac{1927463}{188008 + 1927463} = 2113,87 \text{ N} \quad (72)$$

F_{Smin} – minimální síla ve šroubu [N]

Výpočet předpětí:

$$F_O = F_P \cdot \left(\psi_T + \frac{c_S}{c_S + c_P} \right) = 1498 \cdot \left(0,5 + \frac{188008}{188008 + 1927463} \right) = 2113,87 \text{ N} \quad (73)$$

Velikost předpětí se rovná velikosti minimální síly v šroubu ($F_O = F_{Smin}$).

Přírůstek síly ve šroubu:

$$\Delta F_S = F_p \cdot \frac{c_s}{c_p + c_s} = 1498 \cdot \frac{188008}{188008 + 1927463} = 113,13 \text{ N} \quad (74)$$

Úbytek síly v přírubách:

$$\Delta F_{PŘ} = F_p \cdot \frac{c_p}{c_p + c_s} = 1498 \cdot \frac{1927463}{1927463 + 188008} = 1364,87 \text{ N} \quad (75)$$

Výpočet síly ve šroubu:

$$F_S = F_p \cdot (\psi_T + 1) = 1498 \cdot (0,5 + 1) = 2247 \text{ N} \quad (76)$$

F_S – síla ve šroubu (maximální) [N]

2.4.4 Výpočet utahovacího momentu

Velikost součinitele tření na závitu je zvolena $f = 0,15$, jelikož jsou použity pozinkované šrouby i matice a závit není nijak mazán. Hodnota úhlu profilu α je pro metrický závit 60° .

Výpočet redukovaného třecího úhlu:

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{f}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (77)$$

$$\varphi' = \operatorname{arctg}\left(\frac{f}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{0,15}{\cos\left(\frac{60^\circ}{2}\right)}\right) = 11,74^\circ$$

Výpočet úhlu stoupání závitu:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{Ph}{\pi \cdot d_2} \quad (78)$$

$$\psi = \operatorname{arctg}\left(\frac{Ph}{\pi \cdot d_2}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{1,5}{\pi \cdot 9,026}\right) = 3,028^\circ$$

Výpočet středního průměru stykové plochy:

$$S_D = \frac{d_S + d_D}{2} = \frac{17 + 10}{2} = 13,5 \text{ mm} \quad (79)$$

Výpočet utahovacího momentu:

$$M_T = F_O \cdot \tan(\psi + \varphi') \cdot \frac{d_2}{2} + F_O \cdot f \cdot \frac{S_D}{2} \quad (80)$$

$$M_T = 2113,87 \cdot \tan(3,028 + 11,74) \cdot \frac{9,026}{2} + 2113,87 \cdot 0,15 \cdot \frac{13,5}{2} = 4655,14 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

2.4.5 Bezpečnost šroubu

Výpočet statické síly působící obvodově na závitu:

$$F_Z = F_O \cdot \tan(\psi + \varphi') = 2113,87 \cdot \tan(11,74 + 3,028) = 557,25 \text{ N} \quad (81)$$

Tečná statická síla F_Z je po utažení matice při montáži konstantní. Tato síla působí na střední průměr závitu šroubu d_2 a poslouží pro výpočet napětí v krutu.

Výpočet šroubu na krut:

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} = \frac{F_Z \cdot \frac{d_2}{2}}{\frac{\pi \cdot d_3^3}{16}} = \frac{557,25 \cdot \frac{9,026}{2}}{\frac{\pi \cdot 8,160^3}{16}} = 23,57 \text{ MPa} \quad (82)$$

Výpočet tahového napětí:

$$\sigma_t = \frac{F_S}{S_S} = \frac{F_S}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} = \frac{2247}{\frac{\pi \cdot 8,160^2}{4}} = 42,97 \text{ MPa} \quad (83)$$

Výsledné napětí šroubu podle Guesta:

$$\sigma_{RED} = \sqrt{\sigma_t^2 + 4 \cdot \tau_k^2} = \sqrt{42,97^2 + 4 \cdot 23,57^2} = 63,79 \text{ MPa} \quad (84)$$

Bezpečnost šroubu

Bezpečnost šroubu je vyjádřena součinitelem statické bezpečnosti k_S . Mez kluzu materiálu pro šroub M10 třídy pevnosti 8.8 $\Rightarrow R_e = 8 \cdot 10 = 640 \text{ MPa}$

$$k_S = \frac{R_e}{\sigma_{RED}} = \frac{640}{63,79} = 10,03 \quad (85)$$

Z výpočtu statické bezpečnosti lze říct, že šroubový spoj vyhovuje podmínce bezpečnosti a je značně předimenzovaný. Ovšem výpočet byl proveden při působení pouze statických sil, při jízdních zkouškách bude šroubový spoj vystaven daleko extrémnějším podmínkám a budou na něj působit daleko větší síly.

2.4.6 Určení utahovacího momentu a síly předpětí pro šroub M10

V předchozích bodech byly provedeny výpočty, které určily sílu předpětí daného šroubového spoje a minimální utahovací moment, který je dostačující proti samovolnému uvolnění šroubu při působení provozní síly.

V praxi se pro zajištění dostatečného sevření spoje i po zavedení provozního zatížení doporučuje velikost předpětí pohybujícího se v rozmezí 50 ÷ 90 % smluvní meze kluzu materiálu šroubu. Na druhou stranu, výsledné zatížení nesmí překročit mez kluzu, aby nedocházelo ve spoji ke vzniku trvalých deformací. Také je důležité počítat s poklesem předpětí způsobeným „sednutím“ spoje za provozu.

Pro šroub M10 třídy pevnosti 8.8 je dle tabulek doporučena hodnota utahovacího momentu 48,4 Nm. Tato hodnota je ovšem maximální a jelikož bude šroub dynamicky namáhán, nebylo by vhodné zvolit maximální hodnotu utahovacího momentu. Hodnota utahovacího momentu M_T je zvolena 30 Nm. Jelikož je známá hodnota utahovacího momentu, lze vypočítat sílu předpětí. Výpočet předpětí pro utahovací moment šroubu M10 je vyjádřen z rovnice 86.

$$F_o = \frac{M_T}{\tan(\psi + \varphi') \cdot \frac{d_2}{2} + f \cdot \frac{S_D}{2}} = \frac{30000}{\tan(3,028 + 11,74) \cdot \frac{9,026}{2} + 0,15 \cdot \frac{13,5}{2}} = 13622,8 \text{ N} \quad (86)$$

Pro daný šroubový spoj byla vypočtena síla předpětí při utahovacím momentu. V předchozí kapitole byla zjištěna také minimální síla předpětí. Jelikož by provozní síla neměla být menší než minimální síla předpětí, nemělo by dojít k samovolnému uvolnění šroubu při působení různých osových sil na šroub. I v extrémním případě působení provozní síly v záporných hodnotách nedojde k samovolnému uvolnění šroubu díky vysokému předpětí spoje. Pro zvolený utahovací moment je doporučeno znovu zkontrolovat statickou bezpečnost šroubu.

2.4.7 Bezpečnost šroubu pro zvolený moment

Výpočet šroubu na krut:

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} = \frac{F_z \cdot \frac{d_2}{2}}{\frac{\pi \cdot d_3^3}{16}} = \frac{3591,16 \cdot \frac{9,026}{2}}{\frac{\pi \cdot 8,160^3}{16}} = 151,01 \text{ MPa} \quad (87)$$

Výpočet tahového napětí:

$$\sigma_t = \frac{F_S}{S_S} = \frac{F_S}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} = \frac{11796,75}{\frac{\pi \cdot 8,160^2}{4}} = 225,58 \text{ MPa} \quad (88)$$

Výsledné napětí šroubu podle Gesta:

$$\sigma_{RED} = \sqrt{\sigma_t^2 + 4 \cdot \tau_k^2} = \sqrt{225,58^2 + 4 \cdot 151,01^2} = 376,95 \text{ MPa} \quad (89)$$

Bezpečnost šroubu

Bezpečnost šroubu je vyjádřena součinitelem statické bezpečnosti k_S . Mez kluzu materiálu pro šroub M10 třídy pevnosti 8.8 $\Rightarrow R_e = 8 \cdot 8 \cdot 10 = 640 \text{ MPa}$

$$k_S = \frac{R_e}{\sigma_{RED}} = \frac{640}{376,95} = 1,70 \quad (90)$$

Z výpočtu statické bezpečnosti lze znovu říct, že šroubový spoj vyhovuje podmínce bezpečnosti i při stanovení vyššího utahovacího momentu.

2.5 Výpočet šroubů M6 na beriovém boxu

Jelikož u šroubů držící bateriový box nejsou známy provozní síly jako v případě šroubů M10 držící úchyty ramen, dokážeme vypočítat pouze tuhost šroubu a stlačovaných přírub, v tomto případě tuhost bateriového boxu. Jakmile budeme vědět provozní zatížení šroubu, budeme schopni vypočítat minimální předpětí šroubového spoje.

2.5.1 Tuhost šroubu

Pro výpočet tuhosti šroubu c_s je nutné, stejně jako v případě šroubového spoje se šroubem M10, rozdělit deformovatelnou část šroubu l_s na úseky se stejným průřezem S_s . Tuhosti jednotlivých částí šroubu pak řadíme sériově za sebe. Pro výpočet tuhosti šroubu se volí hodnota $E = 200\,000\text{ MPa}$.

Deformační délka 1. části šroubu:

$$l_{s1} = \frac{1}{2}h + l_{pod} + l_z = \frac{1}{2} \cdot 6 + 1,6 + 85 = 89,6\text{ mm} \quad (91)$$

Deformační délka 2. části šroubu:

$$l_{s2} = l_p - l_z + l_{pod} + \frac{2}{3}k = 104 - 85 + 1,6 + \frac{2}{3} \cdot 6 = 24,6\text{ mm} \quad (92)$$

l_{s1} – první deformační část šroubu [mm]

l_{s2} – druhá deformační část šroubu [mm]

l_z – vzdálenost mezi podložkou a závitem [mm]

h – výška hlavy šroubu [mm]

k – výška matice [mm]

l_p – délka příruby [mm]

l_{pod} – délka podložky [mm]

Tuhost 1. části šroubu:

$$c_{s1} = \frac{E \cdot S_1}{l_{s1}} = \frac{E \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot l_{s1}} = \frac{200000 \cdot \pi \cdot 6^2}{4 \cdot 89,6} = 63112,35\text{ N.mm}^{-1} \quad (93)$$

Tuhost 2. části šroubu:

$$c_{s2} = \frac{E \cdot S_2}{l_{s2}} = \frac{E \cdot \pi \cdot d_3^2}{4 \cdot l_{s2}} = \frac{200000 \cdot \pi \cdot 4,773^2}{4 \cdot 24,6} = 145468,06\text{ N.mm}^{-1} \quad (94)$$

Výsledná tuhost šroubu:

$$C_S = \frac{1}{\frac{1}{c_{S1}} + \frac{1}{c_{S2}}} = \frac{1}{\frac{1}{63112,35} + \frac{1}{145468,06}} = 44015,79 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (95)$$

2.5.2 Tuhost příruby

Deformovaná část přírub je ve tvaru Bachova komolého dvojkužele a při výpočtu se vždy zanedbávají podložky. Tento komolý dvojkužel je převeden na trubku konstantního průřezu, viz kapitola 1.1.4.

Výpočet redukovaného průměru:

Průměr pod maticí, vytváří spolu s průměrem díry komolý dvojkužel a je v tomto případě roven rozměru s matice.

$$d_{RED} = d_s + \frac{l_p}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha = 10 + \frac{104}{2} \cdot \operatorname{tg} 45^\circ = 72 \text{ mm} \quad (96)$$

d_s – průměr dotyku pod maticí [mm]

Výpočet deformačního průřezu přírub:

$$S_p = \frac{\pi \cdot (d_{RED}^2 - d_D^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (72^2 - 6^2)}{4} = 4043,23 \text{ mm}^2 \quad (97)$$

d_D – vnitřní průměr dotyku matice [mm]

Výpočet výsledné tuhosti přírub:

Pro výpočet tuhosti příruby se volí hodnota $E = 71\,000 \text{ MPa}$, jelikož se jedná o hliníkovou slitinu.

$$c_P = \frac{E \cdot S_p}{l_{P1} + l_{P2} + l_{P3}} = \frac{71000 \cdot 4043,23}{104} = 2760282 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (98)$$

c_P – výsledná tuhost přírub [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$]

S_p – průřez příruby [mm^2]

Poměr tuhostí přírub a šroubů:

$$\frac{c_P}{c_S} = \frac{2760282}{44015,79} = 62,71 \quad (99)$$

2.5.3 Určení utahovacího momentu a síly předpětí ve šroubu M6

Pro výpočet vhodného utahovacího momentu je důležitý výpočet redukováného třecího úhlu a úhlu stoupání závitu. Utahovací moment ovšem nelze vypočítat, jelikož neznáme provozní sílu šroubového spojení. Potřebný utahovací moment dosadíme dle tabulky. Velikost součinitele tření na závitu je zvolena $f = 0,15$, jelikož jsou použity pozinkované šrouby i matice a závit není nijak mazán. Hodnota úhlu profilu α je pro metrický závit 60° .

Výpočet redukováného třecího úhlu:

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{f}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (100)$$

$$\varphi' = \operatorname{arctg}\left(\frac{f}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{0,15}{\cos\left(\frac{60^\circ}{2}\right)}\right) = 11,74^\circ$$

Výpočet úhlu stoupání závitu:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{Ph}{\pi \cdot d_2} \quad (101)$$

$$\psi = \operatorname{arctg}\left(\frac{Ph}{\pi \cdot d_2}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\pi \cdot 5,350}\right) = 3,405^\circ$$

Výpočet středního průměru stykové plochy:

$$S_D = \frac{d_S + d_D}{2} = \frac{10 + 6}{2} = 8 \text{ mm} \quad (102)$$

Utahovací moment pro šroub M6 pevnosti 8.8 byl zvolen dle tabulek 9,7 Nm. Jelikož je známý utahovací moment, je možné vypočítat i sílu předpětí spoje.

$$F_O = \frac{M_T}{\tan(\psi + \varphi') \cdot \frac{d_2}{2} + f \cdot \frac{S_D}{2}} = \frac{9700}{\tan(3,405 + 11,74) \cdot \frac{5,350}{2} + 0,15 \cdot \frac{8}{2}} = 7326,15 \text{ N} \quad (103)$$

Pro kompletní výpočet šroubového spoje je nutné znát sílu, které bude na šroubový spoj působit. Po dosazení této síly z dat z jízdních zkoušek budeme schopni určit všechny parametry a potvrdit, zda dojde k samovolnému spojení, či nikoliv.

3. Měření sil ve šroubovém spoji

Před samotným měřením sil ve šroubu pomocí tenzometrických podložek, je nutná jejich kalibrace. Společně s každou tenzometrickou podložkou byl dodán kalibrační list a speciální válečky, které slouží ke kalibraci podložky. Nebylo by tedy nutné kalibrovat tenzometrické podložky, avšak pro ověření dat výrobce bylo rozhodnuto kalibrační list ověřit.

3.1 Kalibrace tenzometrické podložky

Kalibrace tenzometrických podložek je prováděna několika způsoby. První, nejjednodušší variantou je využití originálních kalibračních válečků. V dalším způsobu kalibrace byl vyroben speciální přípravek, který simuluje tah šroubu, mezi kterým je umístěna tenzometrická podložka. Tato kalibrace se provádí na trhacím stroji a pro duplikování výsledku je možné použít také nýtovací stroj, který zaručuje podobné parametry jako trhací stroj.

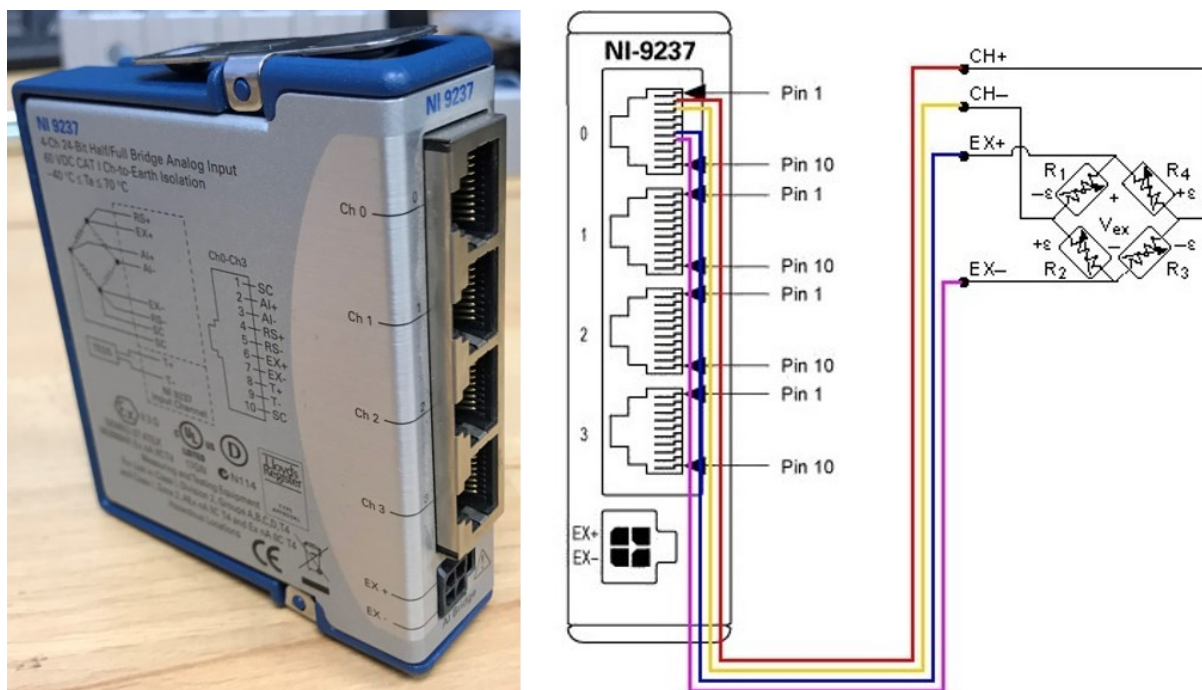
3.1.1 Zapojení komponentů pro kalibraci

Měřicí karta

K získání dat z tenzometrické podložky byla použita měřicí karta NI-9237. Tato karta dovoluje současné zapojení až 4 snímačů najednou, a proto je pro naše měření s tenzometry ideální. Na **Obr. 21** (vlevo) je vidět konkrétní typ měřicí karty.

Vlastnosti karty

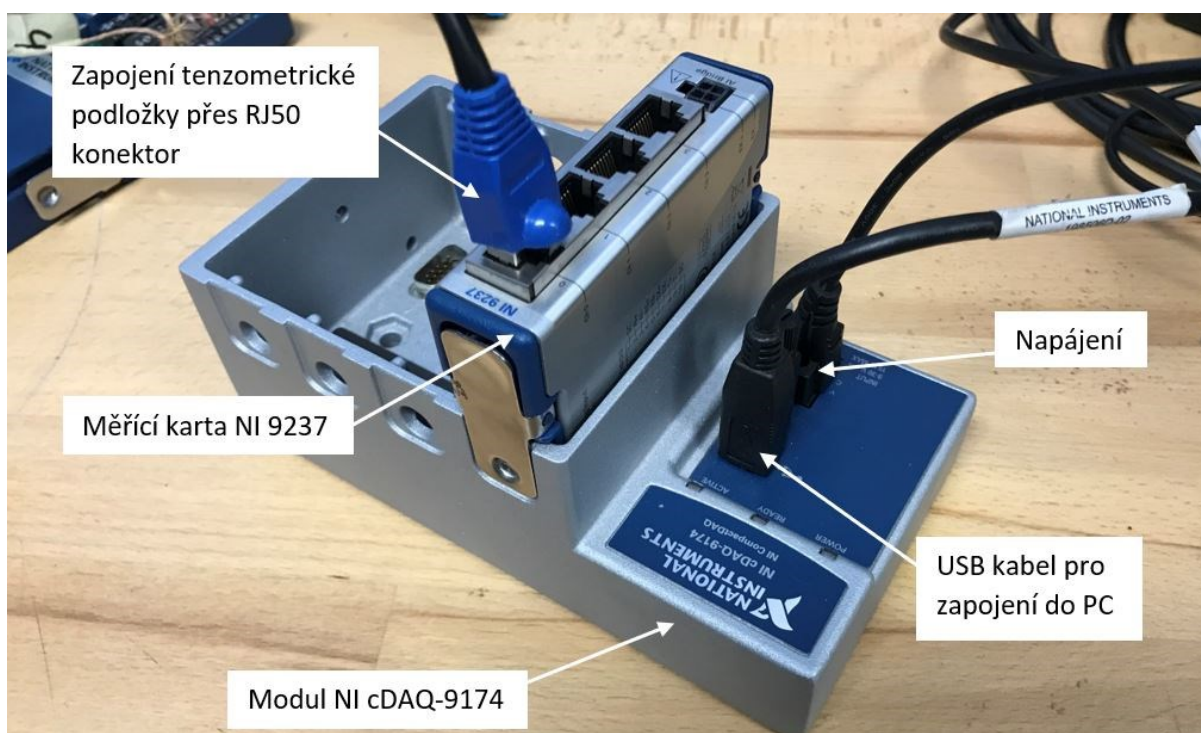
Karta je vhodná pro měření celých a polovičních tenzometrických můstků, jelikož interně obsahuje odpory pro vyvážení můstků. Další její předností je, že kterýkoliv její kanál má svůj vlastní A/D převodník, proto není vzorkovací frekvence omezená multiplexerem. Vzorkovací frekvence karty je od 1 613 Hz do 50 000 Hz. Z důvodu okamžitého vzorkování je tato karta vhodná pro měření rychlých změn na výstupu tenzometrického můstku. Karta má možnosti připojení RJ50 nebo D-SUB. Karta pracuje v rozsahu -40 °C až 70 °C a snese vibrace 5 g a šokově až 50 g. Na **Obr. 21** (vpravo) je zobrazeno schéma zapojení tenzometrické podložky s měřicí kartou. [5, 6]



Obr. 21 Měřicí karta NI-9237 (vlevo), schéma zapojení tenzometrické podložky s měřicí kartou (vpravo) [4]

Zapojení karty

Pro připojení měřicí karty k PC bylo použito šasi cDAQ-9174. Do tohoto zařízení je zapojena měřicí karta. Toto šasi je společně s měřicí kartou propojeno k PC přes USB kabel. Schéma zapojení je zobrazeno na Obr. 22.

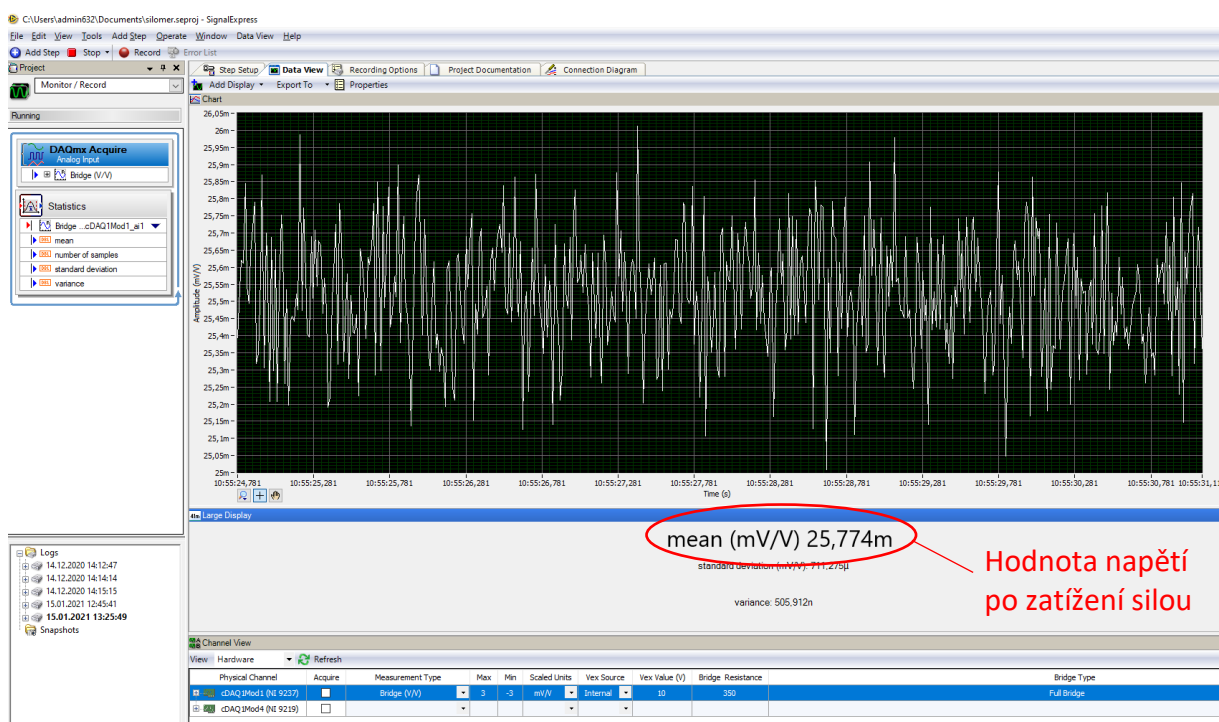


Obr. 22 Schéma zapojení komponentu k PC

Kalibrace tenzometrické podložky

Zvyšováním tlaku případně tahu na trhačím stroji se zvyšovalo napětí na tenzometru. Hodnoty byly zapisovány do tabulky skokově po cca 500 N. Ideálním případem by bylo, kdyby spojením všech naměřených hodnot v tabulce vznikla přímka, která lineárně poroste.

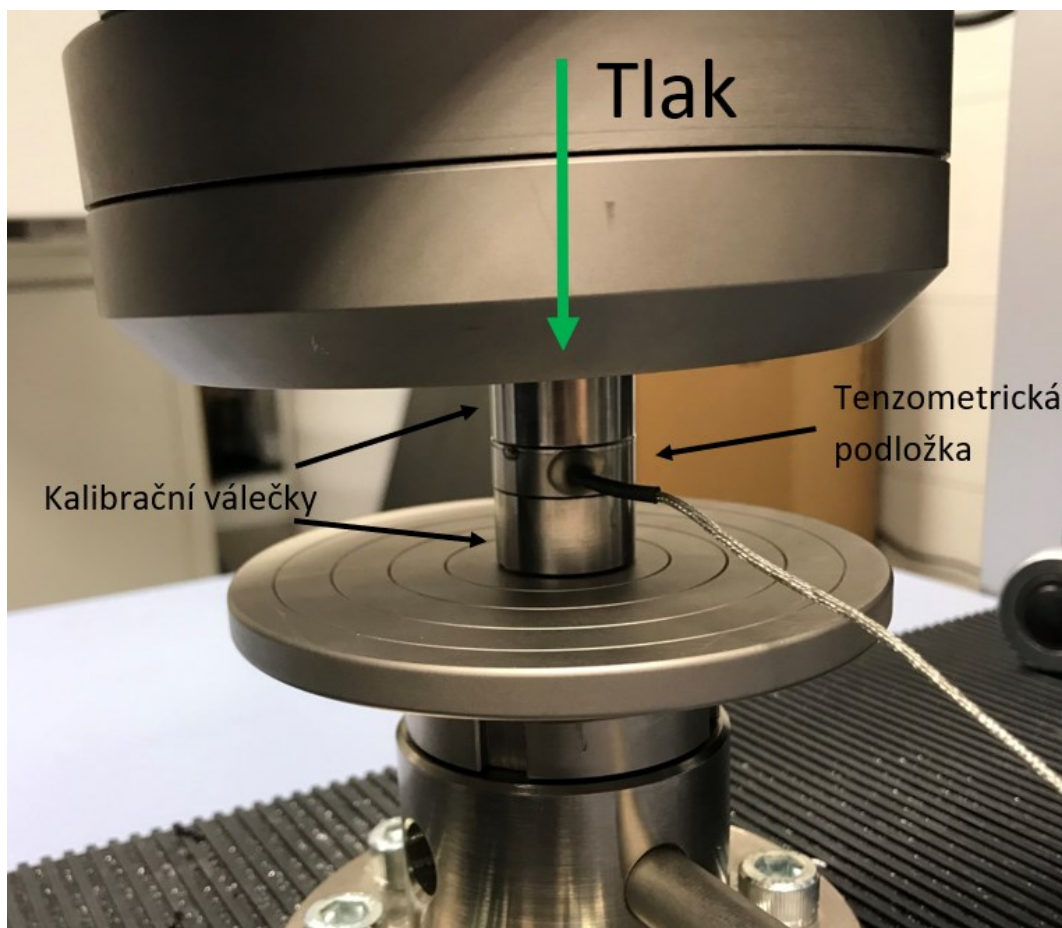
Propojením tenzometru s měřicí kartou jsou přes USB port hodnoty předávány do počítače, kde dochází k jejich zpracování v měřicí aplikaci v programu SignalExpress. Na **Obr. 23** lze vidět prostředí programu SignalExpress a hodnoty, které byly v aplikaci sledovány.



Obr. 23 Prostředí programu SignalExpress

3.1.2 Kalibrace přes kalibrační válečky

Tenzometrická podložka se vloží mezi dva kalibrační válečky a ty se vkládají společně s tenzometrickou podložkou mezi čelisti trhačního stroje (**Obr. 24**). Na všechny tyto části je vyvoláván tlak. Pro zajištění působení pouze osově síly na tenzometrickou podložkou mají válečky na dosedacích plochách v čelistech kulové plochy.



Obr. 24 Tenzometrická podložka mezi kalibračními válečky v trhačním stroji

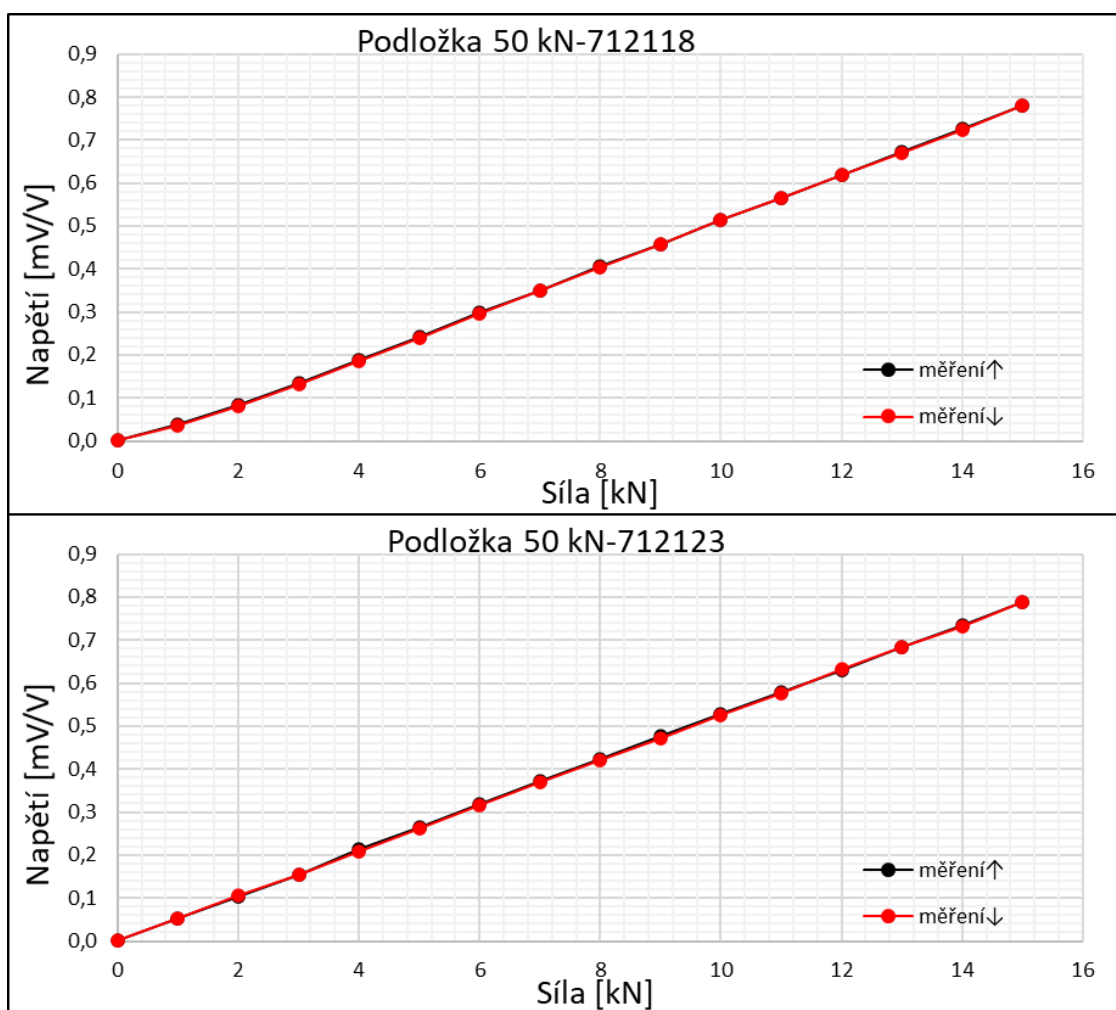
Bylo měřeno dvěma způsoby. Nejprve byla hodnota tlaku zvyšována, a to z nulových hodnot postupně až po cca 15 kN. Poté bylo měřeno obráceně, a to z 15 kN směrem dolů až k nule. Tímto mělo být zkontrolováno, zda při odlehčování tenzometrické podložky nevzniká příliš velká nežádoucí hystereze.

V následující **Tab. 2** v a grafech (**Obr. 25**) jsou zaznamenána naměřená již průměrná data napětí [mV/V] v závislosti na síle tlaku [N] při laboratorní teplotě 25 °C pro obě tenzometrické podložky LCMWD-50KN.

Z grafů lze vyčíst, že hodnoty napětí téměř lineárně rostou v obou typech podložek a také to, že nemá vliv, zda podložky zatěžujeme, nebo zda je odlehčujeme. Hodnoty se v grafu zcela překrývají.

Tab. 2 Průměrné naměřené hodnoty napětí při měření v kalibračních válečcích (podložka-50 kN)

Průměr naměřených hodnot (podložka 50 kN-712118)	N	měření↑ (mV/v)	měření↓ (mV/v)	Průměr naměřených hodnot (podložka 50 kN-712123)	N	měření↑ (mV/v)	měření↓ (mV/v)
	0	0,003	0,003		0	0,001	0,002
	1000	0,053	0,053		1000	0,038	0,035
	2000	0,104	0,105		2000	0,084	0,081
	3000	0,155	0,155		3000	0,135	0,133
	4000	0,213	0,209		4000	0,189	0,186
	5000	0,265	0,263		5000	0,243	0,241
	6000	0,319	0,315		6000	0,298	0,295
	7000	0,372	0,369		7000	0,350	0,349
	8000	0,423	0,420		8000	0,406	0,404
	9000	0,476	0,472		9000	0,459	0,457
	10000	0,529	0,525		10000	0,515	0,513
	11000	0,579	0,576		11000	0,566	0,564
	12000	0,631	0,631		12000	0,620	0,617
	13000	0,683	0,683		13000	0,672	0,671
	14000	0,736	0,733		14000	0,726	0,725
	15000	0,787	0,787		15000	0,780	0,780



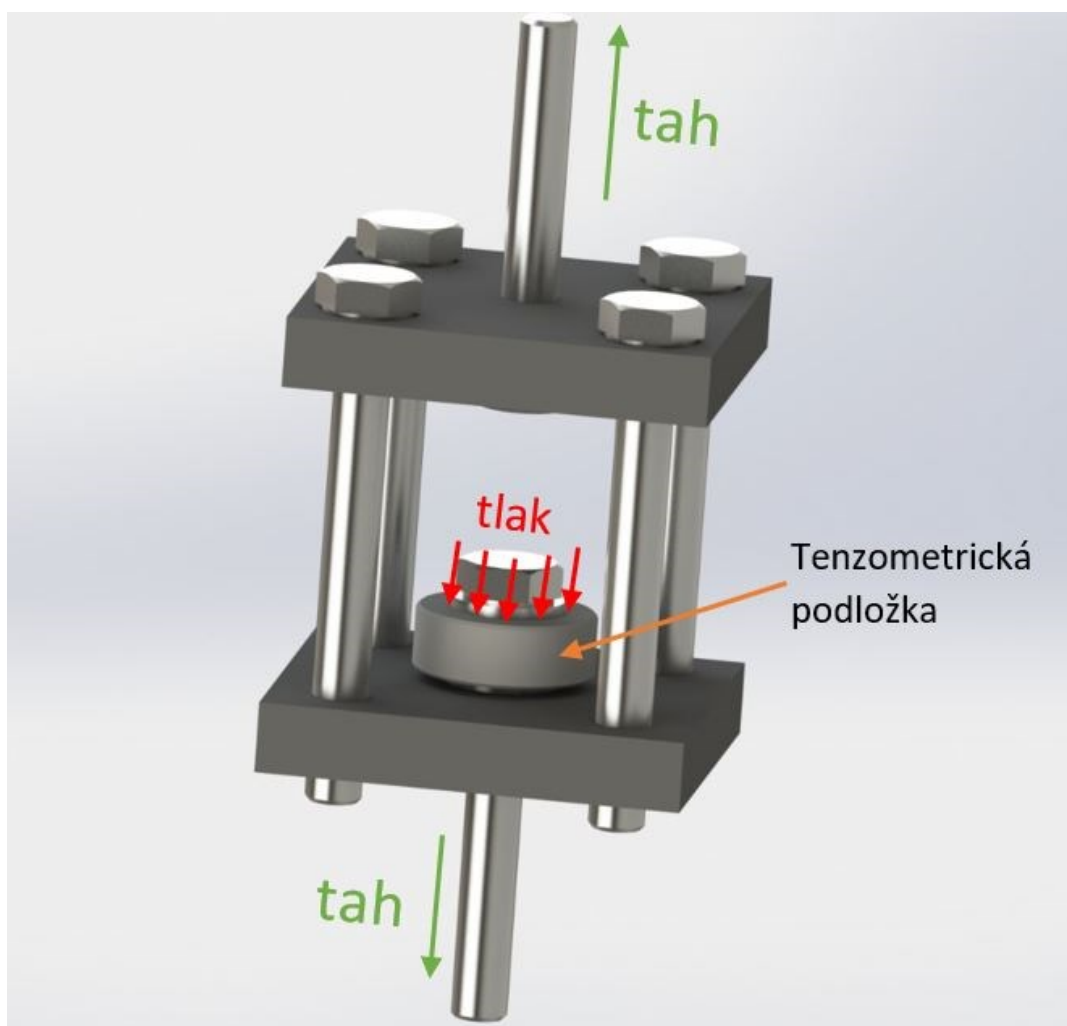
Obr. 25 Grafy naměřených hodnot napětí při měření v kalibračních válečcích

3.1.3 Přípravek na kalibraci tenzometrické podložky

Kalibrace se provádí tak, že snímač je zatěžován etalonovým závažím a jsou odečítány příslušné hodnoty výstupního napětí. Tak vznikne kalibrační křivka.

Jelikož nebyla možnost kalibrovat tenzometrické podložky etalonovým závažím, byla kalibrace prováděna pomocí trhačního stroje, kde se tenzometrická podložka vložila mezi kalibrační válečky a zatížila tlakem, avšak toto zatížení není v běžném provozu zcela reálné, proto byl pro další kalibrační měření tenzometrické podložky vyroben speciální přípravek, který simuluje tlak na tenzometrickou podložku tažením šroubu a představuje tak reálné podmínky při zatěžování šroubového spojení.

Dalším důvodem výroby přípravku bylo to, že nebylo možné uchytit originální kalibrační přípravky do čelistí na trhačním stroji z důvodu použití klimakomory. Klimakomora byla použita z důvodu ověření, zda tenzometrická podložka správně měří i v různých teplotách. Na **Obr. 26** je zobrazen 3D model přípravku na kalibraci.

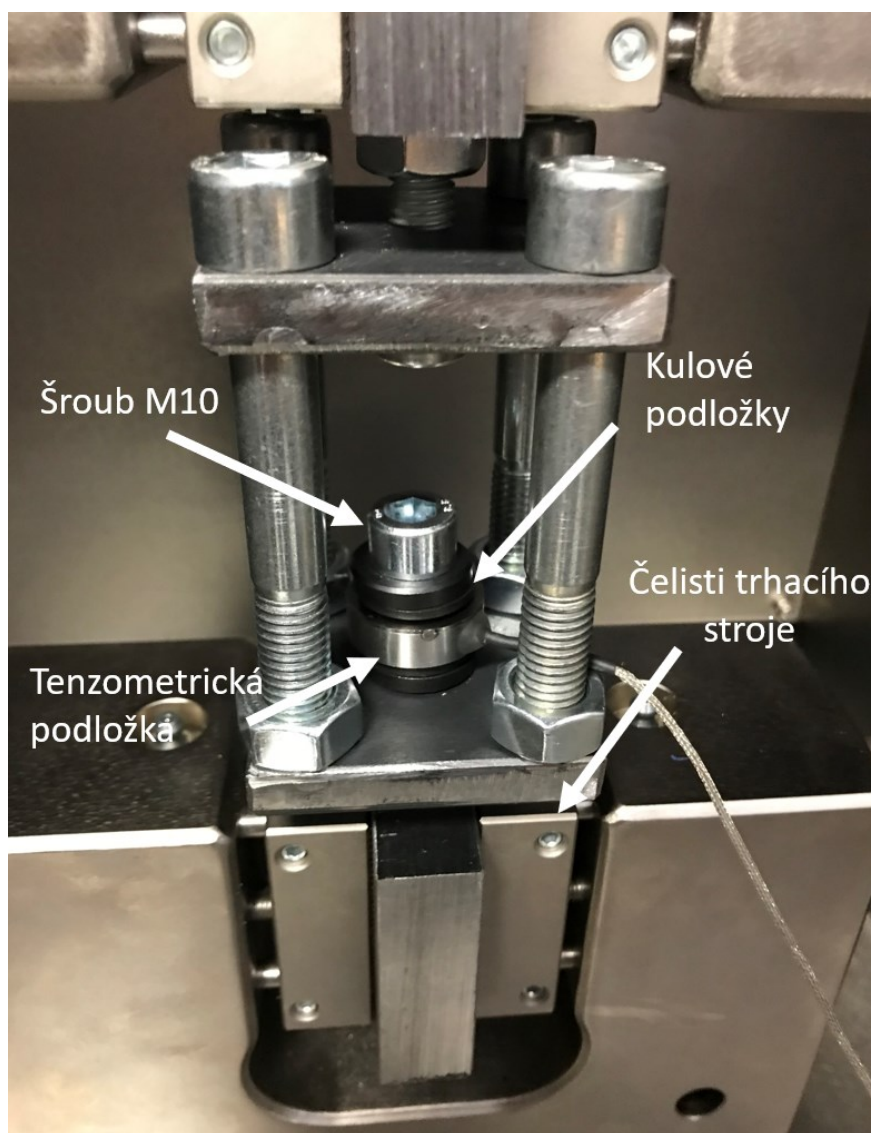


Obr. 26 Přípravek na kalibraci tenzometrické podložky

Z **Obr. 26** lze vidět, že vyvoláním tahu v trhacím stroji vzniká pod šroubem a jeho podložkou síla, která působí na tenzometrickou podložku a tím na ni působí tlakem. Abychom zajistili, že tenzometrická podložka bude namáhána pouze osovou silou a ne ohybem, jsou použity mezi tenzometrickou podložkou a hlavou šroubu takzvané kulové podložky, které byly dodány společně s tenzometry a zajišťují tak působení pouze osových sil a zaručují správné přenesení sil na měřicí plochy tenzometrického snímače.

Trhací stroj

Kalibrace tenzometrické podložky byla prováděna na trhacím stroji Shimadzu AG-X plus 50kN. Tento trhací stroj dokáže vytvořit sílu až 50 kN a při použití klimakomory můžeme testovat vzorky od -40 °C až po 250 °C. Pro upnutí vzorku byly použity klínové čelisti. Na **Obr. 27** je znázorněno upnutí přípravku v klimakomoře.



Obr. 27 Upnutý přípravek v klimakomoře trhacího stroje

3.1.4 Kalibrace tenzometrické podložky LCMWD-50KN

Pro ujištění, zda vyrobený přípravek funguje správně, nevzniká například nežádoucí tření mezi šroubem a přípravkem, nebo správně dosedají plochy podložek na měřicí plochy tenzometru, byla tenzometrická podložka nejprve zatížena pouze závažím.

K tomu byly použity kalibrované kotouče, které se používají jako závaží na motorové brzdě. Těmito závažími byla postupně zatěžována tenzometrická podložka, tím že bylo ubíráno a přidáváno jednotlivé závaží. V následující **Tab. 3** jsou zaznamenána data napětí při zatěžování tenzometrické podložky volně bez přípravku a v **Tab. 4** pak data napětí při zatěžování tenzometru v přípravku.

Tab. 3 Hodnoty napětí po zatížení tenzometru volně bez přípravku

volné zatížení bez přípravku										
Kg	přidávání ↑ (mV/V)	ubírání ↓ (mV/V)	přidávání ↑ (mV/V)	ubírání ↓ (mV/V)	přidávání ↑ (mV/V)	ubírání ↓ (mV/V)	přidávání ↑ (mV/V)	ubírání ↓ (mV/V)	přidávání ↑ (mV/V)	ubírání ↓ (mV/V)
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
23 (50lb)	0,012	0,012	0,012	0,013	0,012	0,012	0,013	0,012	0,011	0,012
46 (100lb)	0,024	0,024	0,025	0,025	0,024	0,024	0,024	0,025	0,024	0,024
69 (150lb)	0,036	0,037	0,036	0,037	0,036	0,036	0,035	0,036	0,036	0,036

Tab. 4 Hodnoty napětí po zatížení tenzometru v přípravku

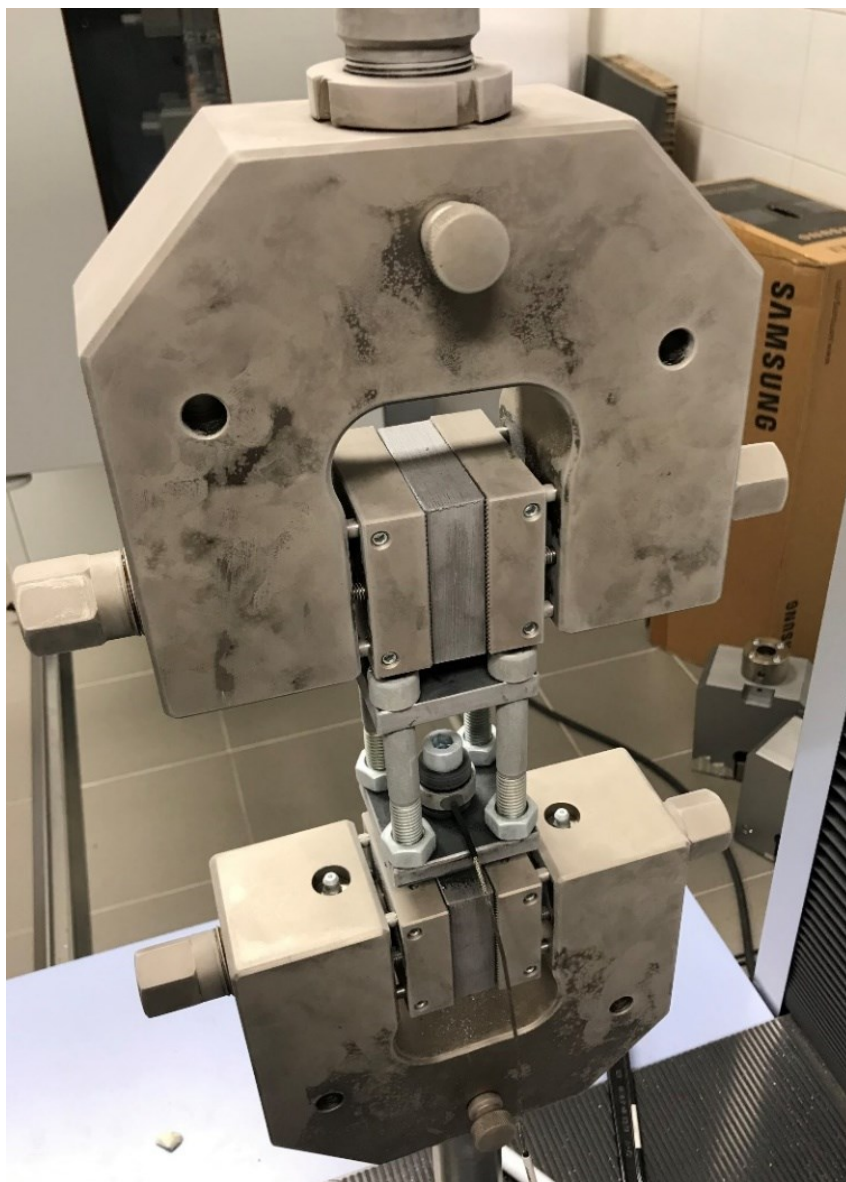
volné zatížení v přípravku										
Kg	přidávání ↑ (mV/V)	ubírání ↓ (mV/V)	přidávání ↑ (mV/V)	ubírání ↓ (mV/V)	přidávání ↑ (mV/V)	ubírání ↓ (mV/V)	přidávání ↑ (mV/V)	ubírání ↓ (mV/V)	přidávání ↑ (mV/V)	ubírání ↓ (mV/V)
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
23 (50lb)	0,012	0,012	0,012	0,013	0,012	0,012	0,013	0,012	0,011	0,012
46 (100lb)	0,023	0,024	0,024	0,025	0,024	0,024	0,024	0,024	0,025	0,024
69 (150lb)	0,036	0,037	0,036	0,036	0,035	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036

Z naměřených dat lze vidět, že hodnoty napětí jsou pro obě měření téměř identické a ve většině případů se naprosto shodují, proto by nemělo mít vliv, zda je tenzometrická podložka v přípravku. Přípravek by měl tedy fungovat i při použití v trhacím stroji.

Pro ověření, že tenzometr udává dané napětí ve všech teplotách, které garantuje výrobce, byla použita klimakomora, která dovoluje měření v rozmezí různých teplot. Tenzometrická podložka byla měřena v teplotách od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až po teploty $45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Toto spektrum teplot je v těchto klimatických podmínkách zcela dostačující.

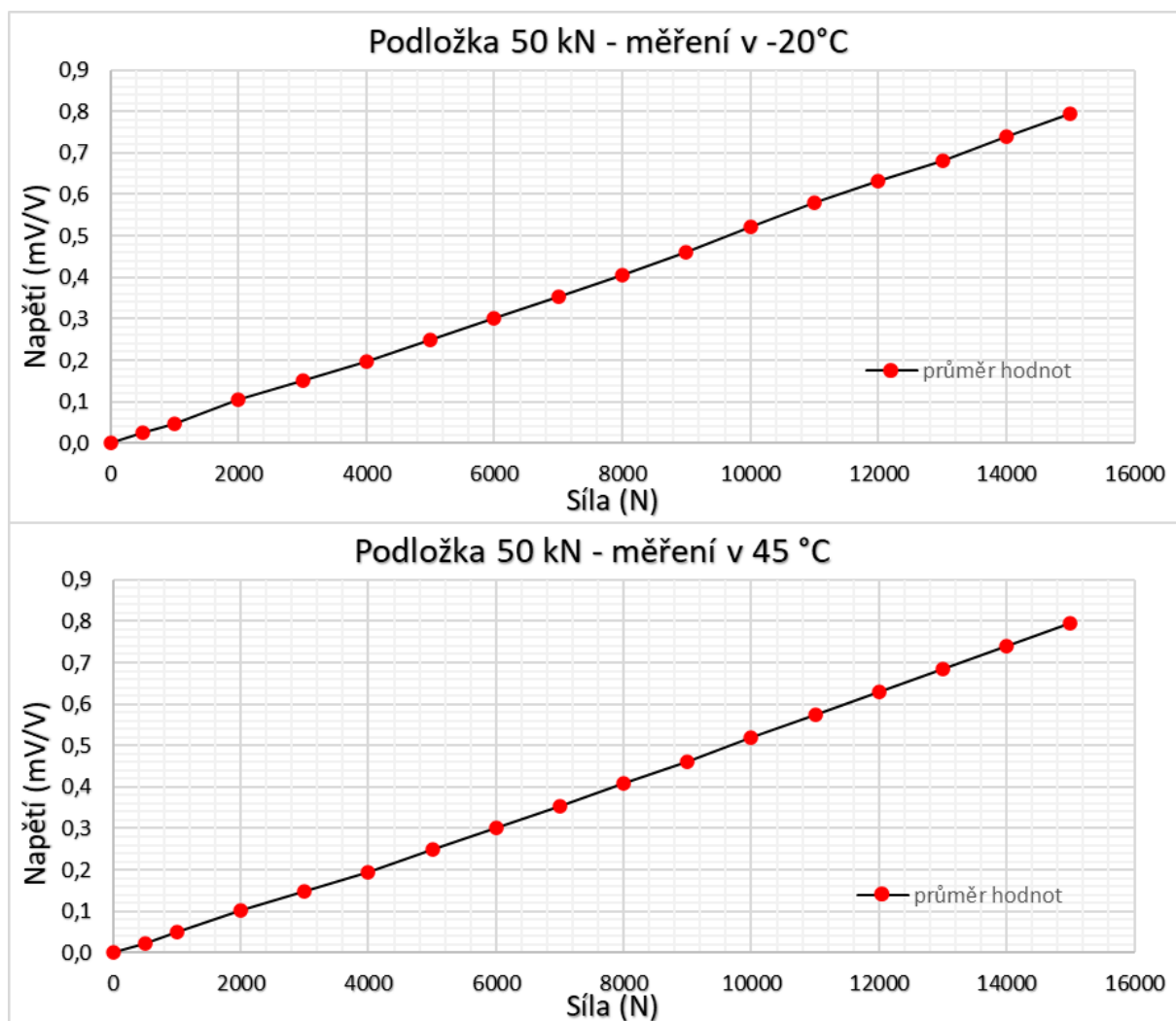
Měření bylo prováděno skokově po $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Měření začalo teplotou $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a postupně byla teplota zvyšována až po hodnoty kolem $45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplotu prostředí přímo udává LCD displej na klimakomore, avšak pro přesnější data byl využit digitální multimetr a teplota byla měřena přímo na tenzometrické podložce. Nastavení teploty je poměrně dlouhý proces, každá změna teploty vyžaduje i několik hodin, proto je měření v klimakomore značně zdlouhavé.

Na **Obr. 28** lze vidět přípravek s tenzometrickou podložkou po vytažení z klimakomory po testování při $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, na celém přípravku a čelistech je vidět značná námraza.



Obr. 28 Přípravek s tenzometrickou podložkou po měření v $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

V následujících grafech (**Obr. 29**) jsou zaznamenána naměřená data napětí [mV/V] a síla tahu [N] v teplotách od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až po $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro tenzometrickou podložku LCMWD-50KN. Byla vybrána pouze data při měření v minimální teplotě ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) a v maximální teplotě ($45\text{ }^{\circ}\text{C}$).



Obr. 29 Hodnoty napětí v závislosti na síle při teplotách $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $45\text{ }^{\circ}\text{C}$

Z grafů vyplývá, že teplota prostředí nemá na měření žádný vliv. Lze také vidět, že hodnoty napětí téměř lineárně rostou a při hodnotách zatížení kolem 15 kN při obou teplotách dosahují hodnot kolem 0,8 mV/V.

Tenzometrické podložky by tedy měly fungovat bez výrazné odchylky v rozmezích od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až po $45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pro ještě přesnější výsledky byla tato samá měření provedena na druhé tenzometrické podložce stejného typu a naměřená data byla mezi sebou porovnávána. I při kalibraci druhého snímače stejného typu bylo dosaženo podobných hodnot a znovu bylo tedy ověřeno správné chování tenzometru v širokém spektru teplot.

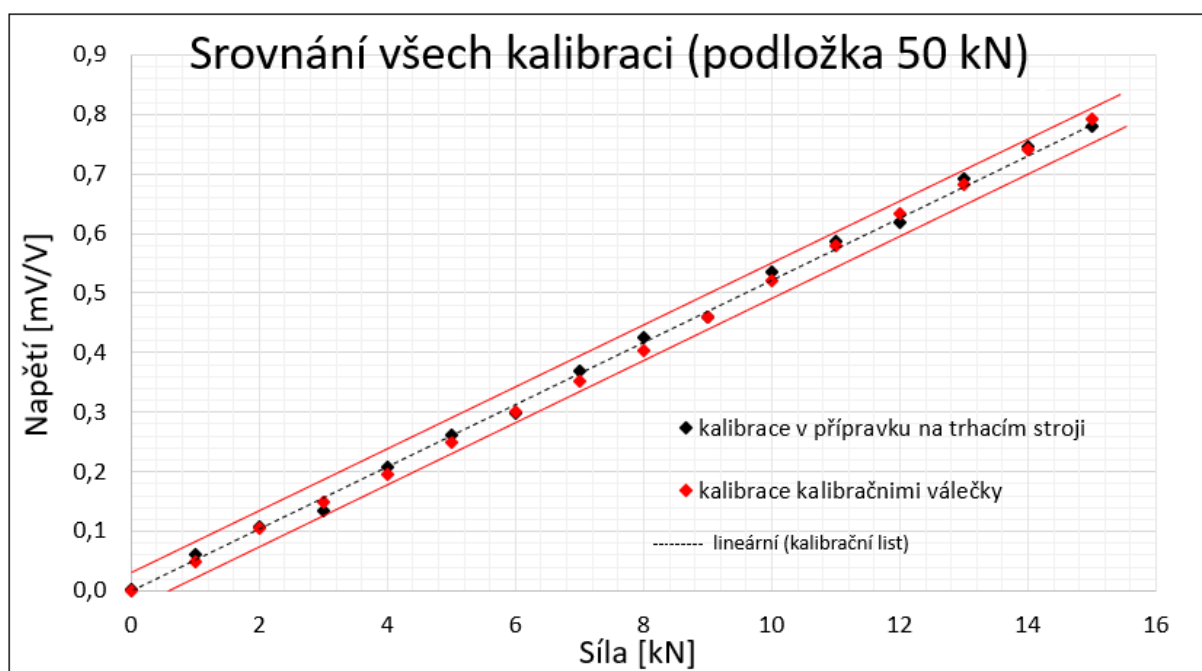
3.1.5 Srovnání naměřených dat s kalibračním listem

S každou tenzometrickou podložkou byl dodán také kalibrační list s hodnotami napětí při různém zatížení. Tyto hodnoty napětí by se v ideálním případě měly shodovat s naměřenými hodnotami.

Tento kalibrační list také obsahuje maximální možnou odchylku, kterou můžou tenzometry při měření dosáhnout. V této odchylce je zahrnuta hystereze a linearita, a je udávána v procentech. Konkrétní hodnota odchylky činí 2 %.

Kalibrační křivka vzniká tak, že je snímač zatěžován etalonovým závažím a jsou odečítány příslušné hodnoty výstupního napětí. Tato kalibrace je tedy mnohem přesnější než kalibrace na trhačím stroji. Kalibrací na trhačím stroji může vzniknout spousta chyb při měření, například nesymetrickým upnutím přípravku v čelistech, anebo prokluzem čelistí při vysokých hodnotách síly.

Na **Obr. 30** jsou porovnána všechna měření (kalibrace kalibračními válečky a kalibrace v přípravku na trhačím stroji) s daty kalibračního listu.



Obr. 30 Srovnání kalibrací s kalibračním listem

V grafu (**Obr. 30**) je dvěma čarami vyznačeno 2% toleranční pole, které udává zmíněnou dovolenou maximální hysterezi a linearitu. Čárkovanou černou čarou je znázorněna přímka linearit dat z kalibračního listu. Z grafu lze vyčíst, že všechny hodnoty napětí, jak pro měření v přípravku, tak pro měření ve válečkách, jsou v dovolených mezích.

Tab. 5 zobrazuje srovnání hodnot z kalibračního listu a dat při kalibraci kalibračními válečky na trhacím stroji pro oba kusy podložek. Po zhlédnutí lze říct, že maximální rozdíl mezi kalibračním listem a kalibrací v kalibračních válečkách byl naměřen při 9 000 N a to 0,9 %, což odpovídá asi 132 N, a v druhém případě při 7 000 N a to 0,7 %, což odpovídá asi 93 N. Tato odchylka je pro obě podložky v praxi minimální a byla tedy splněna podmínka maximální odchylky garantované výrobcem.

Tab. 5 Srovnání hodnot z kalibračního listu a dat při kalibraci kalibračními válečky na trhacím stroji

Tenzometrická podložka 50KN-712118			
Síla	kalibrační list	naměřené hodnoty	rozdíl
1000 N	0,0522 mV/V	0,0590 mV/V	0,0068 mV/V -> 0,8 %
5000 N	0,2611 mV/V	0,2616 mV/V	0,0006 mV/V -> 0,1 %
10000 N	0,5222 mV/V	0,5288 mV/V	0,0067 mV/V -> 0,8 %
15000 N	0,7832 mV/V	0,7897 mV/V	0,0064 mV/V -> 0,7 %
největší rozdíl při 9000 N a činí 0,9 % (132 N = 13,2 KG)			
Tenzometrická podložka 50KN-712123			
Síla	kalibrační list	naměřené hodnoty	rozdíl
1000 N	0,0522 mV/V	0,0530 mV/V	0,0008 mV/V -> 0,1 %
5000 N	0,2611 mV/V	0,2641 mV/V	0,0031 mV/V -> 0,4 %
10000 N	0,5222 mV/V	0,5270 mV/V	0,0048 mV/V -> 0,6 %
15000 N	0,7832 mV/V	0,7873 mV/V	0,0041 mV/V -> 0,5 %
největší rozdíl při 7000 N a činí 0,7 % (93 N = 9,3 KG)			

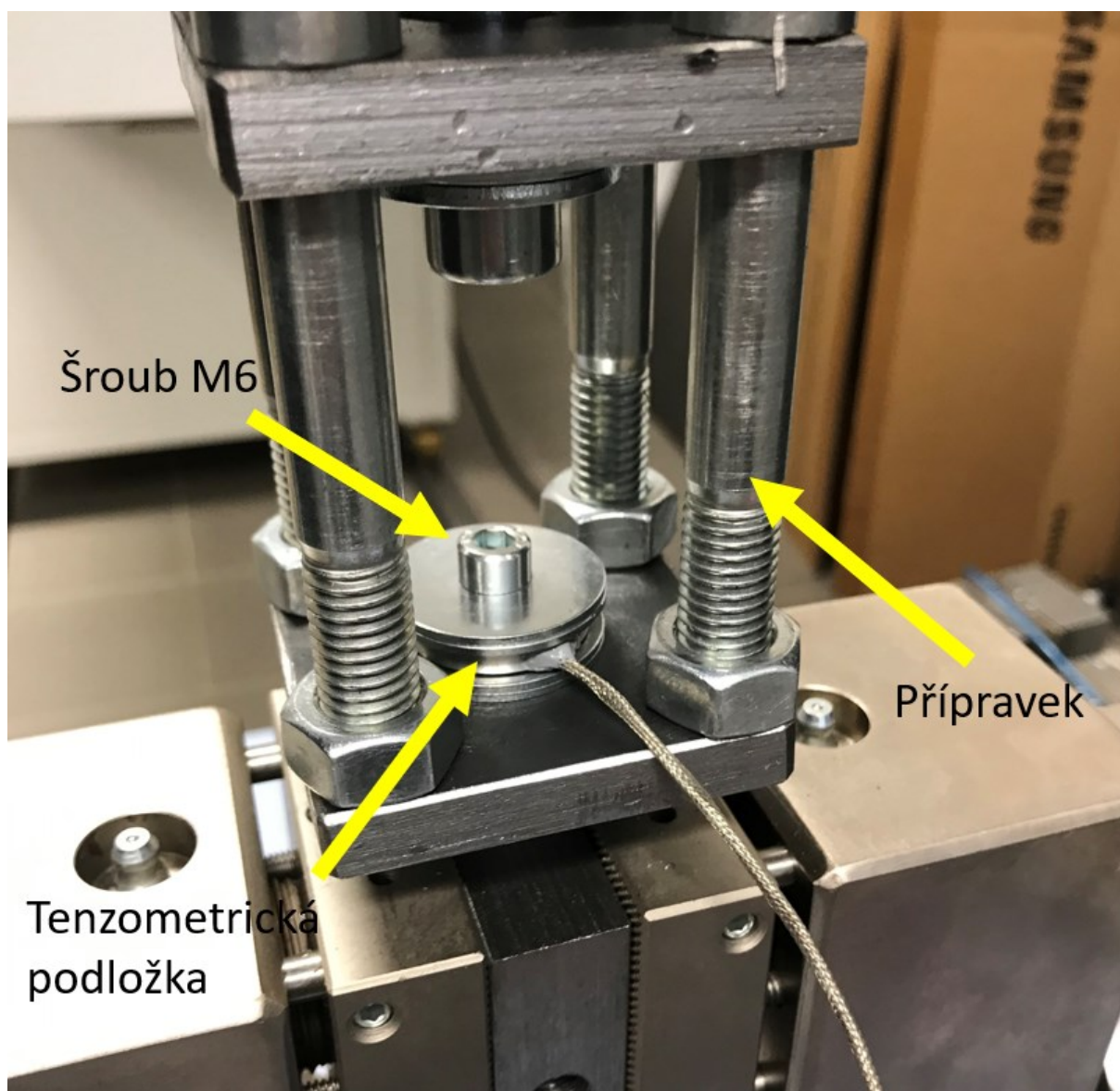
3.1.6 Kalibrace tenzometrické podložky LCM901-6-10KN

Kalibrace podložek určených pro šrouby M6 probíhala obdobným způsobem, jako kalibrace větších podložek v předchozí kapitole. Jelikož nebyl společně s tenzometrickou podložkou dodán kalibrační váleček, mohli jsme provést kalibraci pouze v již vyrobeném přípravku.

Jelikož tento přípravek fungoval dle očekávání při kalibraci tenzometrické podložky pro šroub M10, mohl být přípravek použit i pro kalibraci menšího tenzometru. Tento přípravek však bylo nutné upravit tím, že v místě díry pro šroub byla vložena středící vložka. Jako vložka posloužil přesně vyrobený ocelový váleček.

Další změnou bylo také použití jiných podložek. U předchozího tenzometru byly použity kulové podložky dodané výrobcem, které měly za úkol přenášet pouze osově síly na měřicí plochy tenzometru. Avšak pro tenzometrickou podložku pro šroub M6 byly dodány jiné speciální podložky, které zaručovaly správné dosedání na měřicí plochy tenzometrické podložky. Jednalo se o jednu menší podložku, která byla vložena mezi hlavou šroubu a měřicí plochou tenzometrické podložky a o větší podložku, která byla umístěna z druhé strany a měla

stejnou plochu jako tenzometr. Tímto obě podložky působily proti sobě a vznikala tak výsledná deformace v tenzometrické podložce. Na **Obr. 31** je zobrazen tenzometr pro šroub M6 v přípravku v trhacím stroji.



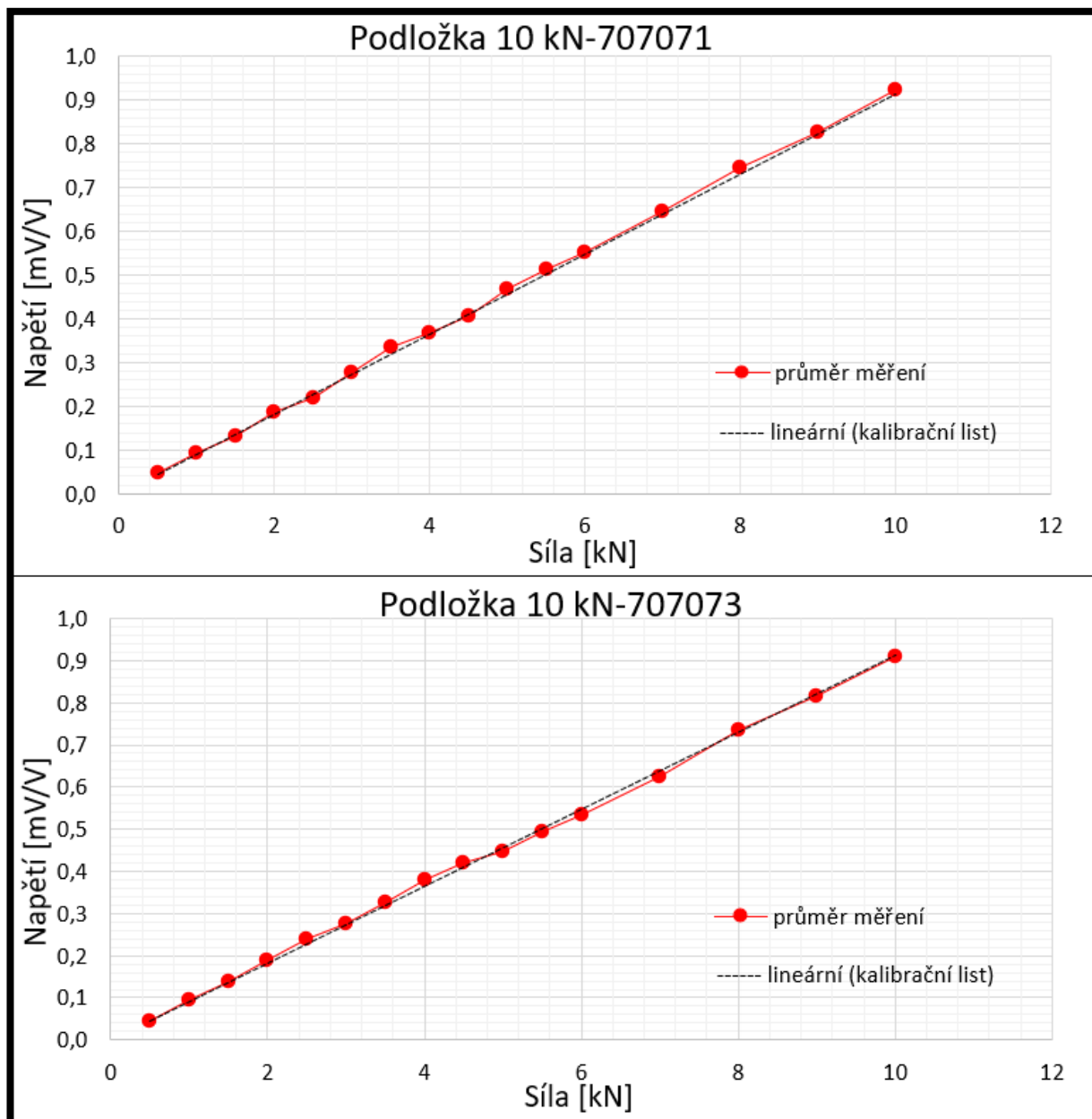
Obr. 31 Tenzometrická podložka pro šroub M6 v trhacím stroji

Kalibrace je prováděna znovu na trhacím stroji postupným zvyšováním síly tahu. Hodnoty byly zvyšovány po cca 500 N a měřilo se znovu dvěma způsoby. Nejprve byla hodnota tahu zvyšována, a to z nulových hodnot postupně až po cca 10 kN. Poté se měřilo obráceně a to z 10 kN směrem dolů až k nule.

Pro zaručení správného chování tenzometrické podložky v spektru teplot byla kalibrace znovu uskutečněna v klimakomoře a podložka byla vystavena teplotě $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplotě $45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Znovu bylo dokázáno, že teplota prostředí má zanedbatelný vliv na výstupní napětí tenzometru a případné odchylky jsou brány spíše jako chyba měření.

Následující graf (**Obr. 32**) znázorňuje naměřená data napětí [mV/V] v závislosti síly v tahu [N] při laboratorní teplotě 25 °C a ve srovnání s kalibračním listem. Lze vyčíst, že hodnoty napětí tvoří téměř dokonale lineární přímku a nevzniká ani nežádoucí hystereze. Oba typy podložek jsou také v mezích 2 %, které udává výrobce. Naměřená data tedy odpovídají datum z kalibračního listu výrobce.



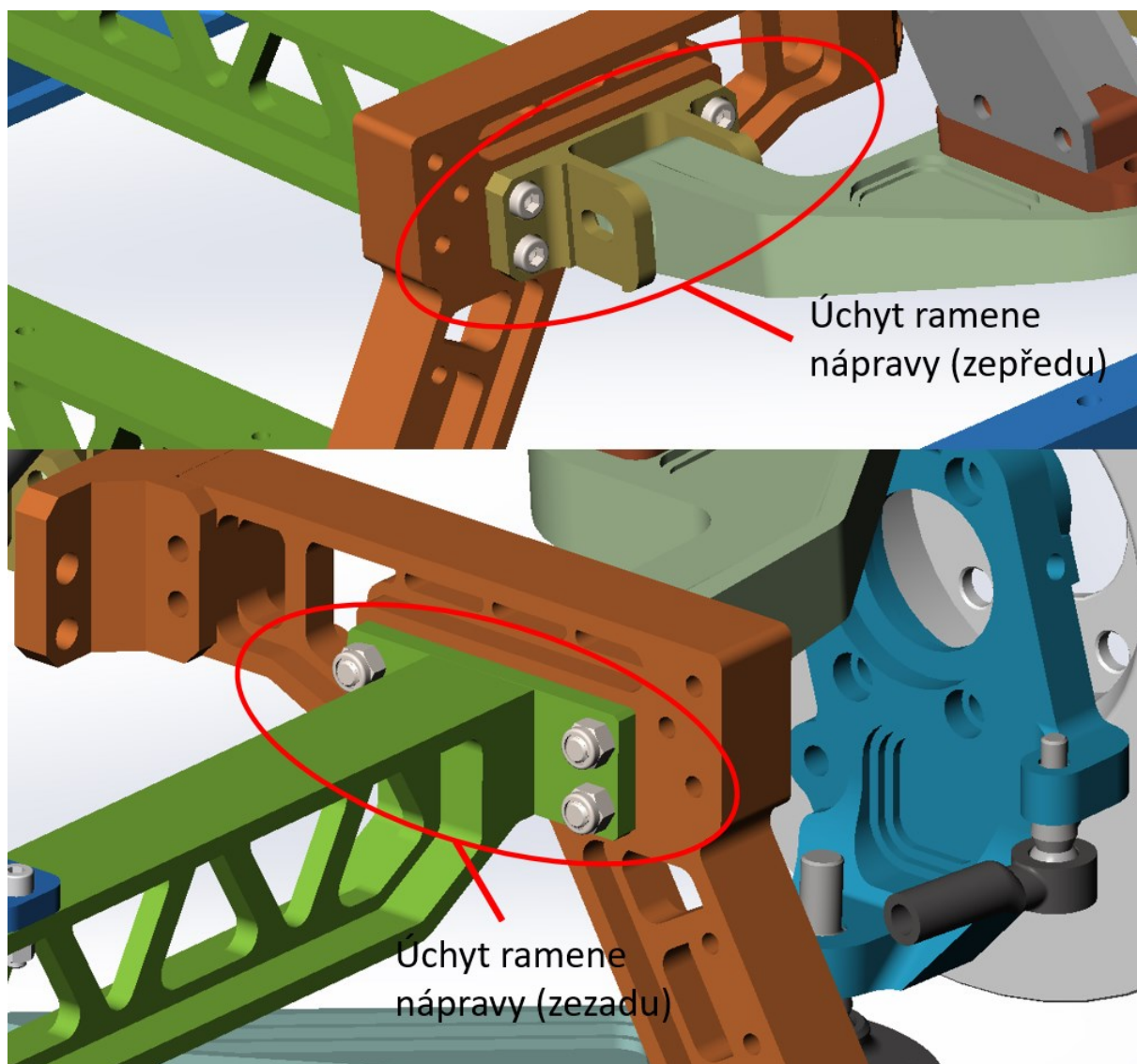
Obr. 32 Hodnoty napětí v závislosti na síle (podložka LCM901-6-10KN)

3.2 Příprava tenzometrických podložek na automobilu

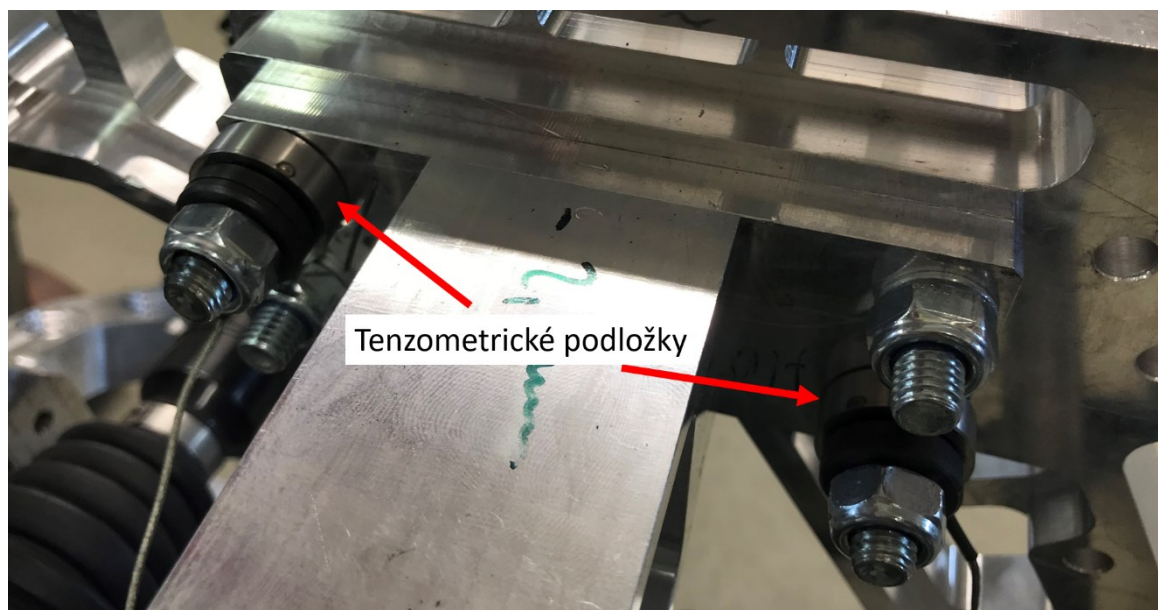
V kapitole 2.1 a 2.2 byla vybrána vhodná místa pro umístění tenzometrů ve šroubovém spoji. Nyní bylo zapotřebí ověřit, zda jsme schopni snímače v jednotlivých místech vůbec instalovat. Instalace tenzometrických podložek na automobilu je taky přípravou na měření sil působících ve šroubovém spoji během jízdních zkoušek.

3.2.1 Instalace tenzometrických podložek pro šroub M10

Tenzometrické podložky pro šroub M10 jsou umístěné v úchytech ramen náprav, a to proti sobě v uhlopříčce. Byl zvolen úchyt horního ramene na levé straně vozidla z důvodu všeobecně většího zatížení levé strany automobilu (umístění řidiče). Na **Obr. 33** je v 3D modelu vyznačen úchyt náprav pro umístění tenzometru. Na **Obr. 34** jsou umístěné tenzometrické podložky na již reálném úchyty na konceptu Titan.



Obr. 33 Úchyt ramene nápravy při pohledu zepředu a zezadu

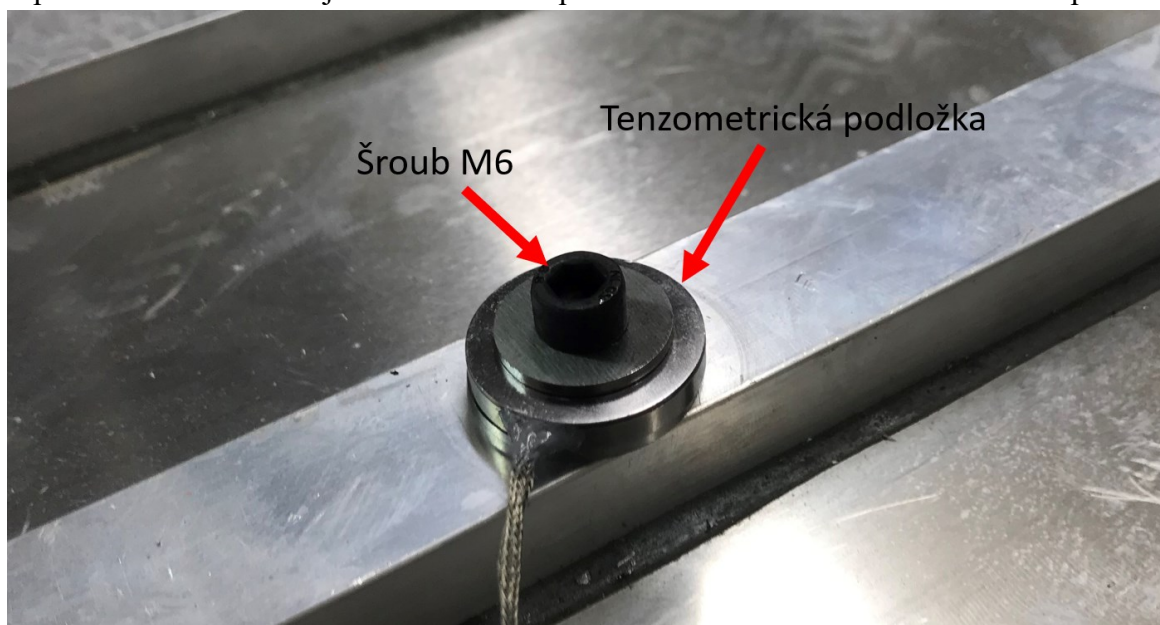


Obr. 34 Umístění tenzometru na úchyty ramene nápravy na konceptu Titan

Tenzometrické podložky budou umístěné na úchyty ramene zezadu jak je vidět na **Obr. 34**. Z obrázku vyplývá, že při montáži snímače bude nutné použití delších šroubů.

3.2.2 Instalace tenzometrických podložek pro šroub M6

Tenzometrické podložky pro šroub M6 jsou umístěné na krytu bateriového boxu, který spojuje jednotlivé bateriové moduly a je připevněn k podloze automobilu. Znovu jako v případě snímačů pro šroub M10 byly tenzometrické podložky umístěné do uhlopříčky proti sobě. Jedna podložka v levém předním rohu bateriového boxu a druhá v pravém zadním rohu. Jak již bylo popisováno v kapitole 2.2.1, je zapotřebí vyrobení speciálního válečku a použití delších šroubů pro přenos sil. Na **Obr. 35** je umístěn snímač pro šroub M6 na bateriovém boxu konceptu Titan.



Obr. 35 Umístění tenzometru na battery boxu

4. Zhodnocení výsledku a návržení dalšího postupu

Jelikož nebyly provedeny reálné jízdní zkoušky na vozidle, jsou v této kapitole zhodnoceny pouze výsledky kalibrace, popsány, za jakých podmínek tenzometrické podložky správně fungují a navrženy postupy, v případě, že se při jízdních zkouškách dokáže samovolnění šroubu nebo jiný problém ve šroubovém spoji.

4.1 Zhodnocení kalibrace

Kalibrace tenzometrické podložky sloužila k určení napětí při různých silách zatěžujících podložku. Po kalibraci jsme schopni určit přesnou hodnotu síly působící na podložku převedenou z výstupního napětí snímače. Jelikož byla zaručena linearita snímače, jsme schopni určit kteroukoliv hodnotu síly jednoduchým přepočtem.

Jednotlivá data byla porovnávána s daty z kalibračního listu, který byl dodán výrobcem ke každému jednotlivému snímači. Bylo ověřeno, že jak při zatížení tenzometru tlakem v kalibračních válečkách, tak při měření v přípravku simulující tah šroubu, bylo dosaženou stejných hodnot napětí v závislosti na síle, jako v případě kalibrace výrobce snímačů. Kalibrační list udává odchylku 2 % a ta byla ve všech měřeních splněna.

Dalším důvodem kalibrace snímače bylo deklarování schopnosti měřit síly na tenzometrickou podložku i v případě rozdílných teplot prostředí. Tenzometr byl vystaven teplotám prostředí od -20 °C až po teplotu 45 °C, což je v našich klimatických podmínkách naprosto dostačující spektrum teplot, a bylo ověřeno, že teplota prostředí nemá na výstupní napětí snímače žádný vliv. Ovšem není vyloučeno, že se napětí v širším spektru teplot nebude lišit s daty výrobce, pro naše účely však tato tenzometrická podložka možnost teplotního spektra měření splňuje.

Při kalibraci bylo také ověřeno, jak důležité je správné zatěžování měřících ploch tenzometrické podložky. Pro tento případ byly společně s každou tenzometrickou podložkou dodány speciální kulové podložky, které zaručovaly správné rozložení síly do měřící plochy snímače. Bylo zjištěno, že při nesprávném umístění těchto kulových podložek vznikala při odlehčování tenzometru hystereze, což mělo za důsledek až o třetinu menších výstupních hodnot napětí při použití stejné působící síly, jako v případě správného použití kulových podložek. Pro reálné měření v provozu je tedy zásadní správné zatížení měřených ploch a správná instalace kulových podložek.

4.2 Navržení dalšího postupu

V analytické části práce byly zjištěny síly, které působí ve šroubovém spoji v úchytech ramen náprav. Po dosazení všech možných působících sil při různých jízdních stavech bylo zjištěno, že při žádném jízdním stavu nebude předpětí ve šroubech tak malé, aby došlo k samouvolnění šroubu. Bylo také vypočteno, že nemůže nastat stav, kdy by vzniklo vytržení závitu nebo dokonce ulomení šroubu, šrouby jsou tedy dostatečně dimenzované.

Pro pojištění šroubového šroubu je ovšem navrženo použití samopojistné matice. Tato matice má v sobě zalisovaný pojistný kroužek, většinou jde o silikon nebo polyamid, a při montáži se tento kroužek deformuje a zařezává mezi závit šroubu. Tímto je docíleno v závitech většího tření.

Při instalaci tenzometrické podložky pro šroub M6 na bateriovém boxu nebylo zřejmé, jaké síly budou při provozních zkouškách na šrouby působit a nelze tak před samotnými jízdními testy říct, zda dojde k samouvolnění šroubů nebo ne. Je předpokládáno, že při provozu vozidla budou na bateriový box působit vibrace od vozovky a je tedy možné, že by mohlo dojít k samouvolnění šroubu, jelikož šroubový spoj je na vibrace velice náchylný.

V případě, že by došlo k samouvolnění, je možné použít chemické pojištění šroubu. Jednou z možností je použití lepidla LOCTITE 270. Toto lepidlo je určené pro upevňování a utěšňování vysoce zatížených spojů vibracemi a rázy. Lepidlo se v prostoru mezi závity vytvrzuje bez přístupu vzduchu a zvyšuje sílu potřebnou k uvolnění. Zároveň také chrání spoj proti korozi a odolává teplotním vlivům. Tento typ pojištění je vhodný pro spoje, u kterých se předpokládá nerozebíratelnost. Na **Obr. 36** lze vidět použití lepidla LOCTITE 270 na šroubu.



Obr. 36 Použití lepidla LOCTITE 270 [15]

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo měření zatížení šroubových spojů automobilových konstrukcí. Úvodní část byla věnována šroubům a jejich zatížení v provozu. Dále byl vysvětlen princip tenzometrie a popsán snímač, který je schopen měřit zatížení šroubů. V další části práce byla navržena vhodná místa pro umístění tenzometrických podložek na automobilu, zjištěny očekávající síly působící na šroub a následně vypočteno dané šroubové spojení. Praktická část byla věnována kalibraci snímače pro měření sil ve šroubech. V poslední části byly zhodnoceny výsledky kalibrace a navržen další postup.

Při určení vhodných míst pro tenzometrické podložky na automobilu nás velice limitoval tvarový zámek jednotlivých součástí. Ze začátku bylo vybráno více míst, která musela být následně zavržena z důvodu nemožného umístění snímačů právě kvůli tvarovému zámku. Tvarový zámek součástí zajišťuje rozprostření sil a v praxi má tento typ spoje obrovské výhody, jelikož ulevuje šroubovému spoji, avšak pro měření zatížení šroubového spoje byl tento tvarový zámek nežádoucí.

Zvláště obtížná byla zprvu kalibrace tenzometrických podložek. Při odlehčování, tedy ubírání síly na snímači, vznikala hystereze, a hodnoty napětí byly až o třetinu nižší než hodnoty při zatěžování tenzometrické podložky. Přípravek byl několikrát upravován, dokonce byl navržen test na nýtovacím stroji, který měl duplikovat měření na trhacím stroji. Vše nakonec vyřešily kulové podložky, které byly instalovány pod hlavou šroubu a přenášely tak působící síly na měřicí plochy tenzometru. Při měření tedy velice záleží na správném zatěžování měřících ploch snímače.

Z výpočtů zatížení šroubů bylo dokázáno, že při provozu vozidla nevznikne tak malé předpětí šroubového spoje, které by vedlo až k jeho samovolnému uvolnění. V případě, že by se šroubový spoj přece jenom uvolnil, byla navržena řešení, která by měla tento problém eliminovat. Toto tvrzení platí však pouze pro šrouby M10, kde byly analyticky vypočteny síly, které působí na šroubový spoj. Pro šrouby M6 bude nutné provést reálné jízdní zkoušky a z naměřených dat navrhnout další postup.

Výsledkem práce je kalibrace snímače pro měření sil působících ve šroubovém spoji, navržení umístění těchto snímačů na vozidle a předběžné určení působících sil. Bohužel nemohl být splněn bod zadání zabývající se jízdními zkouškami a ověření působících sil na šrouby v praxi z důvodu problému při montáži automobilu Titan. Experiment je však připraven na reálné jízdní zkoušky, které by se měly konat na polygonu Tatra v Kopřivnici.

Seznam obrázků

Obr. 1 Šroubový spoj	2
Obr. 2 Síly působící na závit [1]	3
Obr. 3 Samosvorný závit [1]	4
Obr. 4 Profil závitu s ostrým úhlem [1]	5
Obr. 5 Výpočet tuhosti příruby [1]	8
Obr. 6 Diagram předpjatého šroubového spoje [3]	9
Obr. 7 Tenzometrická podložka LCMWD 50KN od firmy Omega.....	11
Obr. 8 Základní zapojení Wheatstonova můstku [8]	13
Obr. 9 Úchyty ramen náprav na automobilu Titan	15
Obr. 10 Přehled působících sil na nápravu automobilu	16
Obr. 11 Zjednodušení náprav – pohled zepředu	18
Obr. 12 Rozložení na obrazce při pohledu zepředu	19
Obr. 13 Zjednodušení náprav – pohled z boku	21
Obr. 14 Rozložení na obrazce při pohledu z boku	22
Obr. 15 Zjednodušení náprav – pohled shora	24
Obr. 16 Rozložení na obrazce při pohledu shora	25
Obr. 17 Umístění tenzometrů pro šroub M6 na battery boxu	29
Obr. 18 Originální šroubový spoj (vlevo), Použití vložky pod tenzometr (vpravo)	30
Obr. 19 letecký pohled na zkušební areál Tatry [11]	31
Obr. 20 Schéma rozměrů šroubu M10 použitých na úchytu ramen náprav	33
Obr. 21 Měřicí karta NI-9237 (vlevo), schéma zapojení tenzometrické podložky s měřicí kartou (vpravo) [4]	44
Obr. 22 Schéma zapojení komponentu k PC	44
Obr. 23 Prostředí programu SignalExpress	45
Obr. 24 Tenzometrická podložka mezi kalibračními válečky v trhacím stroji	46
Obr. 25 Grafy naměřených hodnot napětí při měření v kalibračních válečkách	47
Obr. 26 Přípravek na kalibraci tenzometrické podložky	48
Obr. 27 Upnutý přípravek v klimakomoře trhacího stroje	49
Obr. 28 Přípravek s tenzometrickou podložkou po měření v -20 °C.....	51
Obr. 29 Hodnoty napětí v závislosti na síle při teplotách -20 °C a 45 °C.....	52
Obr. 30 Srovnání kalibrací s kalibračním listem	53
Obr. 31 Tenzometrická podložka pro šroub M6 v trhacím stroji	55

Obr. 32 Hodnoty napětí v závislosti na síle (podložka LCM901-6-10KN).....	56
Obr. 33 Úchyt ramene nápravy při pohledu zepředu a zezadu	57
Obr. 34 Umístění tenzometru na úchytu ramene nápravy na konceptu Titan.....	58
Obr. 35 Umístění tenzometru na battery boxu	58
Obr. 36 Použití lepidla LOCTITE 270 [15].....	60

Seznam tabulek

Tab. 1 Hodnoty reakcí v ose y pro úchyty ramen náprav.....	28
Tab. 2 Průměrné naměřené hodnoty napětí při měření v kalibračních válečkách (podložka-50 kN)	47
Tab. 3 Hodnoty napětí po zatížení tenzometru volně bez přípravku	50
Tab. 4 Hodnoty napětí po zatížení tenzometru v přípravku	50
Tab. 5 Srovnání hodnot z kalibračního listu a dat při kalibraci kalibračními válečky na trhacím stroji	54

Seznam použité literatury

- [1] KALÁB, Květoslav. *Části a mechanismy strojů: pro 2. a 3. ročník bakalářského studia*. Skriptum, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2015.
- [2] FOJTA, Lubomír. *Analýza šroubových spojů při aplikaci moderních spojovacích prvků, povlaků a maziv*. 2017. Bachelor's Thesis. České vysoké učení technické v Praze. Výpočetní a informační centrum.
- [3] BAYER, Adam. Variantní řešení spojení nosníků pojezdové dráhy. 2015.
- [4] MULTIFUNCTION DAQ. *NI Forum* [online]. [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://forums.ni.com/t5/Multifunction-DAQ/Strain-gauge-set-up-with-NI-9237/td-p/1063629?profile.language=en>
- [5] MINAŘÍK, Mark. Modernizace pracoviště s tenzometry v laboratoři senzorů neelektrických veličin. 2019.
- [6] National Instruments, NI 9237 datasheet, online]. [cit. 2021-03-02] Dostupné z: https://www.ni.com/pdf/manuals/374186a_02.pdf .
- [7] OmegaEng, Load washers for measuring bolt compression forces, datasheet, [online]. [cit. 2021-03-02] Dostupné z: <https://br.omega.com/omegaFiles/pressure/pdf/LCMWD.pdf>
- [8] VARINSKÝ, Matěj. *Odporové tenzometry-vlastnosti a jejich experimentální ověření*. 2018. Bachelor's Thesis. České vysoké učení technické v Praze. Výpočetní a informační centrum.
- [9] Měření síly pomocí tenzometrů zapojených do můstku [online]. [cit. 2021-03-02] Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/STB/laboratore/3_LU_tenzometry.pdf
- [10] Odporové tenzometry [online]. [cit. 2021-03-02] Dostupné z: <https://homel.vsb.cz/~jur286/mast/tenzometry.htm>
- [11] Zkušební areál Tatra, [online]. [cit. 2021-03-02] Dostupné z: <https://www.tatra.cz/vas-tatra-partner/zkusebni-areal/>
- [12] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel*. František Vlk, 2003.
- [13] VLK, František. *Podvozky motorových vozidel*. František Vlk, 2006.

[14] ZBOŽÍNEK, Vladimír. Návrh materiálu rámu vozidla a aplikace progresivní metodiky zkoušení v praktických provozních podmínkách. 2018.

[15] Loctite 270 - 250 ml zajišťovač šroubů VP, Prumex.cz [online]. [cit. 2021-03-02]
Dostupné z: <https://www.prumex.cz/vysoko-pevnostni/>